

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales  
2018-2019

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE  
ESTRUCTURAS.

*Trabajo Fin de Grado*

# Estudio del Comportamiento Mecánico a Tracción de Elastómeros Dieléctricos

---

Autor: Víctor J. Casas Molina

Tutor:

Ángel Arias Hernández

Leganés, 4 de julio de 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## RESUMEN

Los elastómeros dieléctricos se adscriben en torno a un grupo mayor de polímeros denominados electroactivos, estos polímeros gozan de gran interés actualmente debido a diferentes fenómenos encontrados en ellos. Uno de estos fenómenos es el de la denominada electrostricción, la capacidad de un material para deformarse bajo la acción de un campo eléctrico.

Estos elastómeros presentan, junto a este comportamiento, otras propiedades, como el bajo coste o la bio-compatibilidad, que los hacen potencialmente aptos para numerosas aplicaciones en diferentes campos de la técnica, como la medicina o la robótica.

Aunque actualmente se están estudiando las propiedades eléctricas de estos materiales profundamente, y se están obteniendo ciertos éxitos en la construcción de simples prototipos, existe aún una gran barrera para alcanzar la comprensión plena de su comportamiento mecánico.

El presente Trabajo Fin de Grado realiza un acercamiento directo al estudio del comportamiento mecánico de estos materiales mediante la evaluación de las propiedades más características de un material representativo de la familia de los elastómeros dieléctricos: el VHB®, un elastómero acrílico desarrollado por la marca 3M® que posee una excelente respuesta a la electrostricción.

Para estudiar sus características, se han desarrollado ensayos de tracción sobre el material para estudiar su respuesta a diferentes velocidades de deformación, número de ciclos, orientación del material y temperatura. Concretamente, se han estudiado las peculiaridades más representativas de este tipo de materiales: fenómenos de histéresis, comportamiento viscoelástico, fenómenos de relajación de la tensión y la presencia de un efecto denominado Mullins, el cual se manifiesta como un ablandamiento progresivo del material con la sucesión de los ciclos de carga.

Los resultados obtenidos han permitido extraer información que ayuda a comprender mejor el comportamiento del material en líneas generales, al igual que se espera que esta facilite futuros intentos de modelado.

Ciertos resultados, como los obtenidos a partir del comportamiento a fatiga y de la gran variación que experimenta el comportamiento a tracción frente a sensibles cambios de temperatura entre otros, parecen indicar que no se trata del material óptimo para el diseño de actuadores de uso intensivo, aunque por el contrario, se han encontrado otras características, como la gran capacidad de absorción de energía, que los hacen interesantes para otras aplicaciones, como la absorción de impactos o el estudio de los mismos.

Acompaña al estudio un análisis del impacto socio-económico y un presupuesto que recogen, conjuntamente, el coste de la investigación y la repercusión que puede proyectarse sobre el entorno social e industrial del presente trabajo.

**Palabras clave:** Polímeros electroactivos; Elastómeros dieléctricos; Electrostricción; Músculo artificial; VHB, Histéresis; Mullins; Relajación; Creep.



## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría detenerme un momento para dedicar un pensamiento a todas aquellas personas que me han hecho posible llegar hasta aquí:

Quiero agradecer a mi tutor, profesorado y técnicos de laboratorio del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, sus consejos, los cuales han hecho el trabajo mucho más fácil y llevadero.

A mis padres y a mi hermana, que me han dado el apoyo emocional y económico que me ha permitido llegar hasta aquí.

A mis compañeros de fatiga durante mis años de estudio en la carrera, tanto los que están dentro de ella, Martín D. que va por ti, como a los que están fuera, Bea G. esta eres tú.

Especial mención merece, mi antiguo profesor de física del instituto, José Angosto, el cual consiguió despertar en mí el hambre de conocimiento y me dio las herramientas necesarias para llegar hasta aquí.

Muchas gracias a todos.

Víctor J. Casas



## ÍNDICE DE CONTENIDO

Abreviaturas.....	1
Barbarismos.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Estado del arte: antecedentes y apoyos del estudio .....	5
1.2. Propuesta del estudio y aportaciones originales .....	8
1.3. Hipótesis y objetivos .....	11
1.3.1. Hipótesis de partida .....	11
1.3.2. Objetivo general .....	12
1.3.3. Objetivos específicos .....	12
1.4. Estructura de la memoria.....	12
2. MÉTODOS Y EXPERIMENTACIÓN .....	14
2.1. Marco Regulador .....	15
2.2. Instrumental empleado .....	17
2.2.1. Ensayos de tracción longitudinal.....	17
2.2.2. Ensayos de tracción transversal .....	18
2.2.3. Ensayos de comportamiento a alta temperatura.....	19
2.2.4. Ensayos de comportamiento a baja temperatura .....	20
2.3. Preparación y manipulación de muestras .....	20
2.4. Caracterización fundamental .....	22
2.4.1. Ensayo de tracción longitudinal .....	22
2.4.2. Ensayo de tracción transversal .....	24
2.5. Caracterización avanzada .....	25
2.5.1. Ensayo de tracción longitudinal con múltiples cargas sucesivas.....	27
2.5.2. Ensayo de tracción longitudinal con cargas sucesivas incrementadas ..	28
2.5.3. Comportamiento a ciclos de carga y descarga de tracción simple .....	29
2.5.4. Comportamiento a ciclos de tracción y compresión .....	30
2.6. Comportamiento del material frente al tiempo.....	31
2.6.1. Ensayo de relajación .....	32
2.6.2. Estudio de la respuesta a diferentes impulsos .....	32
2.6.3. Estudio del comportamiento a fatiga mecánica del material.....	33
2.7. Caracterización termo-mecánica del material .....	34
2.7.1. Estudio del comportamiento del material a altas temperaturas .....	34

2.7.2.	Estudio del comportamiento del material a bajas temperaturas .....	36
3.	RESULTADOS .....	37
3.1.	Ensayo de tracción longitudinal .....	37
3.2.	Ensayo de tracción transversal .....	38
3.3.	Ensayo de cargas sucesivas sin incremento de la fuerza .....	39
3.4.	Ensayo de cargas sucesivas con incremento de la fuerza .....	40
3.5.	Ciclos de carga y descarga a tracción .....	41
3.6.	Ciclos de carga y descarga a tracción y compresión .....	42
3.7.	Ensayo de relajación .....	43
3.8.	Estudios de la respuesta a impulsos.....	45
3.8.1.	Ensayo de la respuesta a función cuadrada .....	45
3.8.2.	Ensayo de la respuesta a función sinusoidal .....	45
3.9.	Ensayos de fatiga mecánica .....	46
3.10.	Ensayos de comportamiento a alta temperatura .....	47
3.11.	Ensayos de comportamiento a baja temperatura .....	49
4.	ESTUDIO DE LOS CICLOS DE HISTÉRESIS.....	50
4.1.	Cálculo de la energía disipada mediante histéresis en carga y descarga .....	50
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
5.1.	De las pruebas de tracción: endurecimiento y anisotropía .....	57
5.2.	De las pruebas de cargas sucesivas y el efecto Mullins .....	59
5.3.	De los ciclos de carga y descarga y el fenómeno de histéresis .....	61
5.4.	De los ensayos de respuesta en función del tiempo .....	62
5.5.	De los ensayos de fatiga mecánica .....	64
5.6.	De los ensayos de caracterización termo-mecánica .....	65
6.	CONCLUSIONES .....	67
6.1.	Conclusiones generales.....	67
6.2.	Discusión final .....	69
6.3.	Análisis socio-económico.....	70
6.3.1	Entorno global del impacto económico.....	70
6.3.2.	Presupuesto.....	71
6.4.	Trabajos futuros.....	73
6.4.1.	Continuación de los trabajos de caracterización mecánica conducidos .....	73
6.4.2.	Nuevos ensayos de caracterización mecánica .....	74



6.4.2.1.	Estudio de la fluencia lenta a tensión constante .....	74
6.4.2.2.	Estudio de aparición de sinergias en el material .....	75
6.4.3.	Estudios del comportamiento electromecánico .....	76
6.4.4.	Estudios del comportamiento electro-térmico .....	76
6.4.5.	Aplicación estructural: Impacto sobre membrana de VHB®.....	77
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXO A.	HOJA DE PROPIEDADES DE VHB® 4910F .....	81
ANEXO B.	PLANOS DEL ÚTIL DE FIJACIÓN TRANSVERSAL .....	83
ANEXO C.	DIAGRAMA DE GANTT .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1: Esquema del planteamiento acoplado de propiedades de los polímeros electroactivos (PEA). .....	4
Fig. 1.2: Limpiaparabrisas ejecutado usando un PEA [8]. .....	5
Fig. 1.3: Actuador compuesto de polímeros piezoeléctricos [8]. .....	6
<i>Fig. 1.4: Diferentes aplicaciones piezoeléctricas y piroeléctricas de los polímeros [21].</i>	<i>7</i>
Fig. 1.5: Esquema del planteamiento metodológico del problema planteado. ....	9
Fig. 1.6: Ilustración en la que se aprecia el estado de relajación (a) y el de paso de corriente (b) [17]. .....	9
Fig. 2.1: Probeta a emplear: Tipo 2 de ISO 527-3 [24]. .....	15
Fig. 2.2: (1) Mordazas para fijación de la muestra, (2) Ordenador, (3) Monitor, (4) Módulo analógico de toma de datos. ....	17
Fig. 2.3: Detalle del útil de fijación, donde se aprecian las placas con sus tornillos. ....	18
Fig. 2.4: (1) Cámara climática, (2) Termopar auxiliar, (3) Controlador de temperatura, (4) Módulo de control general. ....	19
Fig. 2.5: Probetas recortadas para tracción longitudinal, el VHB se encuentra en la cara superior, pero al ser transparente se puede observar la cubierta protectora. ....	20
Fig. 2.6: Siete probetas sin recortar para el ensayo de tracción transversal. ....	21
Fig. 2.7 Curva ideal de un material hiperelástico [26]. .....	22
Fig. 2.8. Montaje del ensayo de tracción transversal. ....	24
Fig. 2.9: Curva idealizada del efecto Mullins [28]. .....	25
Fig. 2.10: Unidad elástica variable representando el efecto Mullins (A), y unidad de Maxwell representando el efecto viscoelástico remanente (B) [15]. ....	26
Fig. 2.11: Ciclo para cargas y descargas en tracción simple a 0,11 mm/s. ....	30
Fig. 2.12: Ciclo para cargas y descargas en tracción simple a 5mm/s. ....	30
Fig. 2.13: Colocación de las muestras en la cámara climática, la varilla que se aprecia es el termopar auxiliar. ....	35
Fig. 3.1: Curva tensión deformación del comportamiento en tracción longitudinal para probetas de material VHB sin histórico previo de cargas. ....	37
Fig. 3.2: A la izquierda probeta sin deformar, a la derecha, probeta deformada a un 90,9 %. Nótese que la reducción de área es uniforme ya que el patrón dibujado se distorsiona de manera homogénea. ....	37
Fig. 3.3: Curva tensión deformación del comportamiento en tracción transversal sobre material virgen. ....	38

Fig. 3.4: A la izquierda probeta sin deformar en el ensayo transversal, a la derecha probeta deformada al 90,9%. Nótese la acusada estricción que presenta la muestra.	38
Fig. 3.5: Curva tensión deformación del comportamiento en condiciones cuasiestáticas (baja velocidad).	39
Fig. 3.6: Ensayo de tracción con cargas sucesivas a baja velocidad.	39
Fig. 3.7: Ensayo de tracción con cargas sucesivas a alta velocidad.	40
Fig. 3.8: Ensayos con cargas incrementadas a 0,11 mm/s	40
Fig. 3.9: Ensayo de carga y descarga a 1 mm/s.	41
Fig. 3.10: Ensayo de carga y descarga a 5 mm/s.	41
Fig. 3.11: Resultados de los ciclos a 0,22 mm/s.	42
Fig. 3.12: Resultados de los ciclos a 10 mm/s.	42
Fig. 3.13: Diferencia de comportamiento entre ciclos sinusoidales.	43
Fig. 3.14: Deformación contra tiempo en ensayo de relajación.	43
Fig. 3.15: Tensión contra tiempo en ensayo de relajación.	44
Fig. 3.16: Stress rate contra tiempo en ensayo de relajación.	44
Fig. 3.17: Respuesta del material a función escalón.	45
Fig. 3.18: Respuesta del material a función sinusoidal.	45
Fig. 3.19: Comportamiento del material a fatiga sin recuperación entre pruebas.	46
Fig. 3.20: Comportamiento del material a fatiga con recuperación entre pruebas.	46
Fig. 3.21: Recuperación de la probeta tras 5 minutos transcurridos desde el final del ensayo térmico.	47
Fig. 3.22: Recuperación de la probeta tras 15 minutos transcurridos desde el final del ensayo térmico.	47
Fig. 3.23: Recuperación de la probeta tras 25 minutos transcurridos desde el final del ensayo térmico.	48
Fig. 3.24: Recuperación de la probeta tras 72 horas transcurridas desde el final del ensayo térmico.	48
Fig. 3.25: Comparación de las curvas tensión deformación tras pasar 5, 15 y 25 minutos a temperatura ambiente tras 24 horas a -24°C. La curva amarilla es la de una probeta virgen sin tratamiento alguno.	49
Fig. 4.1: Ajuste de polinomios a las curvas tensión-deformación de los ciclos a 0,11 mm/s.	51
Fig. 4.2: Ajuste de polinomios a las curvas tensión-deformación de los ciclos a 5mm/s.	51
Fig. 4.3: Diagrama de la energía disipada a 0,11 mm/s.	55
Fig. 4.4: Diagrama de la energía disipada a 5 mm/s.	55

Fig. 4.5: Diferencia de la energía disipada por cada ciclo y velocidad.....	56
Fig. 5.1: Área bajo curva remanente respecto de la primera carga por el efecto Mullins. .....	60
Fig. 5.2: Volumen global negociado de PVDF con previsiones hasta 2020 [34]. ....	71
Fig. 5.3: Montaje del ensayo de sinergias, a la izquierda se muestra el boceto del bloque hecho a partir de tres láminas pegadas, a la derecha, las tres láminas aseguradas en las mordazas por separado. ....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Organización de los PEA [10].....	3
Tabla 2.1: Resumen de las dimensiones de probeta por naturaleza del ensayo. ....	21
Tabla 2.2: Planificación del programa de cargas y descargas para la observación del efecto Mullins.....	28
Tabla 2.3: Parámetros del ensayo de ciclos de carga y descarga a tracción simple. ..	29
Tabla 4.1: Polinomios para las curvas a 0,11 mm/s. ....	52
Tabla 4.2: Polinomios para las curvas a 5 mm/s. ....	52
Tabla 4.3: Valores de la densidad de energía de deformación para los ciclos a 0,11 mm/s.....	53
Tabla 4.4: Cortes con el eje X de los polinomios.....	54
Tabla 4.5: Valores de la densidad de energía de deformación para los ciclos a 5mm/s. ....	54
Tabla 5.1: Desglose del presupuesto.....	72
Tabla 5.2: Costes totales del proyecto. ....	72

## Abreviaturas

**EAP:** *Electro-active Polymers* o polímeros electro-activos (PEA).

**PVDF:** *Polyvinylidene fluoride* o polifluoruro de vinilideno.

**PP:** Polímeros piezoeléctricos.

**DE:** Elastómeros dieléctricos.

**VHB:** *Very High Bond*, marca comercial de un elastómero acrílico de la casa 3M.

**ASTM:** *American Society for Testing and Materials*.

**AENOR:** Asociación Española de Normalización y Certificación.

## Barbarismos

**Creep:** Es conocido en español como fluencia lenta y se da en elastómeros sometidos a tensiones constantes, el suceso se da al evolucionar las deformaciones en función del tiempo, es conocido también con el término de *cold flow*.

**Filled Rubbers:** Elastómeros con compuestos inorgánicos incorporados a su composición, se caracterizan por tener una baja temperatura de transición vítrea.

**Stress relaxation:** Fenómeno que aparece en los elastómeros dieléctricos entre otros, este fenómeno se manifiesta al relajarse el elastómero, es decir, cuando deja de experimentar tensión a una deformación constante, ocurre inmediatamente una vez se alcanza el estado de deformación. En castellano puede traducirse como relajación de la tensión.

**Stress rate:** Tasa de relajación de la tensión definida para los fenómenos de relajación de la tensión, se expresa en unidades de presión partido de unidades de tiempo y mide la velocidad de relajación a una deformación constante dada.

**Creep Strain Rate:** Tasa de fluencia lenta, indica la velocidad a la que se deforma un material en estado de tensión constante y homogénea.

**Creep Modulus:** La tensión total aplicada a carga constante dividido entre la deformación total sufrida.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, es bien conocido el efecto piezoeléctrico que experimentan algunos materiales, el cual toma lugar cuando se aplica un campo eléctrico de tal manera que la corriente recorra un material de esta naturaleza a su través. Este, experimentará a consecuencia de ello, una deformación de su geometría y viceversa: cuando se ejerza alguna presión sobre este, aparecerá una diferencia de potencial entre sus extremos opuestos [1], [2].

Sumado a este fenómeno, cabe mencionar un efecto análogo al anterior presente en todos los materiales dieléctricos, la electrostricción, la cual, debido al desplazamiento de iones en las estructuras cristalinas, provoca una deformación del material debida a la aplicación de un campo eléctrico [3].

Estos peculiares efectos han sido ampliamente estudiados en todo tipo de materiales, pero este estudio en concreto pretende centrarse en ciertos materiales de naturaleza polimérica, los cuales, con el auge de la producción y la innovación en el campo de los materiales plásticos han cobrado suma importancia en la industria debido a las prestaciones que ofrecen con un coste relativamente bajo y con una producción simple en comparación con otros materiales estructurales.

Especial mención merecen los polímeros electro-activos (PEA), los cuales pueden desarrollar una amplia variedad de deformaciones que oscila entre el 10% hasta el 300% en promedio sometidos a corrientes eléctricas [4], [5]. Las propiedades eléctricas que presentan, junto a su naturaleza polimérica les hacen potencialmente útiles para su implantación en multitud de aplicaciones, las cuales van desde el campo médico, con teorías amplias sobre su potencial como posibles materiales protésicos [6], [7], hasta aplicaciones en robótica ya ensayadas con resultados positivos materializados en eficaces actuadores contruidos con estos plásticos [8].

Sin embargo, varios problemas están frenando el avance en las investigaciones relacionadas. Por una parte, existe la complejidad inherente al modelo descriptivo del material, el cual no ha sido todavía desarrollado de manera íntegra por requerir de amplios datos experimentales [9]. Es una tarea ardua, pues en él intervienen factores constructivos como las porosidades remanentes tras la fabricación, factores de operación, como el problema de la anisotropía que presentan, debido a que sus propiedades no son idénticas en sus direcciones principales, o factores que deriven de la interrelación de las propiedades mecánicas y eléctricas del material. No se deben olvidar las no linealidades que existen en las curvas tensión-deformación características de los materiales mencionados.

Por otra parte, existen aún pocas investigaciones que se ocupen puramente del enfoque acoplado que estos materiales requieren. Ciertamente existen completos estudios sobre las propiedades mecánicas [10] y eléctricas por separado, pero es complicado encontrar a fecha de hoy información fiable sobre la caracterización conjunta. Aunque escasa, la literatura existente tiene algunos errores conceptuales sobre las magnitudes y propiedades eléctricas [11].

Como ya se podrá apreciar, el problema no es para nada trivial, pues el enfoque centrado en la frontera entre propiedades ocasiona que la modificación de un conjunto de ellas modifique el contiguo. Por ello, se ha tratado de centrar el esfuerzo del estudio en un conjunto de propiedades que tenga una repercusión sobre el resto lo más contenida posible, y para lograr esto, se ha elegido un grupo de polímeros dentro de los PEA bien conocido y representativo del conjunto; a su vez el material de prueba que se ha empleado es uno que goza de unas propiedades (tanto propias como del entorno actual) que lo hace representativo de su familia.

Los polímeros electro-activos se subdividen en multitud de familias, pero fundamentalmente se pueden descomponer en dos grupos principales: los de tipo iónico y los de tipo eléctrico, estos grupos se diferencian en función del mecanismo que rige la respuesta mecánica ante los estímulos externos [9], [10].

A su vez, centrando la mira sobre los de tipo eléctrico, pues son los que destacan por sus aplicaciones, se pueden distinguir también, dos familias: los polímeros piezoeléctricos (PP) (adscritos dentro de los ferroeléctricos), cuya naturaleza ha motivado la idea para este estudio, y los elastómeros dieléctricos (DE). Las cuales sufren los fenómenos de piezoelectricidad y electrostricción respectivamente.

EAP class	Materials
Ionic EAPs	Polymer gels (PG)
	Ionic polymer-metal composites (IPMC)
	Conjugated polymers (CP)
	Carbon nanotubes (CNT)
Electronic EAPs	Piezoelectric polymers (PP)
	Electrostrictive polymers (EP)
	Dielectric elastomers (DE)
	Liquid crystal elastomers (LCE)
	Carbon nanotube aerogels

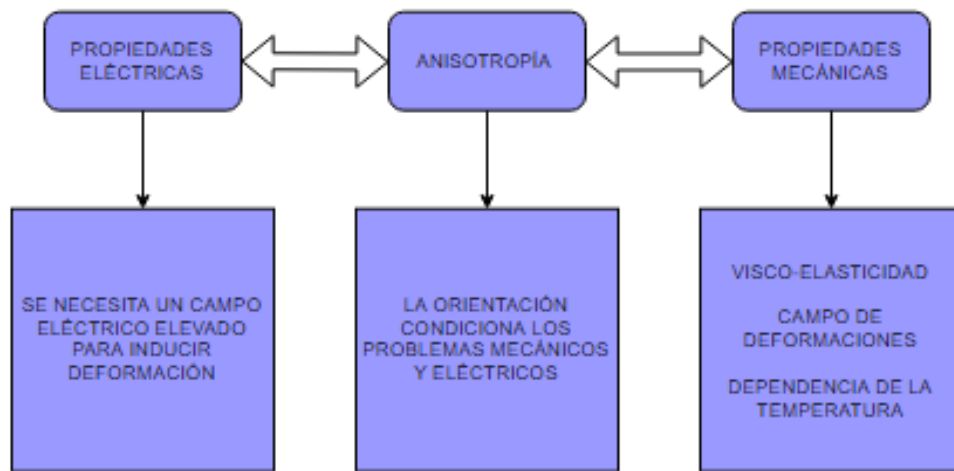
Tabla 1.1: Organización de los PEA [10].



De ambas familias existen materiales ampliamente comercializados que permiten la realización de las pruebas experimentales sobre las que estriba este trabajo. Pero siguen presentando los mismos problemas anteriormente mencionados.

La orientación de las cadenas poliméricas y otros problemas relativos a la orientación (como la dirección de impresión en el caso de la fabricación aditiva con impresoras 3D [12], [13]) contribuyen a los problemas de anisotropía ya presentes, modificando las propiedades.

Como se aprecia en el siguiente diagrama, tanto las propiedades mecánicas como eléctricas son por su naturaleza fenómenos direccionalmente orientados. Así, la anisotropía y los problemas de orientación median entre las naturalezas eléctrica y mecánica de los PEA, dando variabilidades que dificultan la obtención de un modelo de aplicación general.



*Fig. 1.1: Esquema del planteamiento acoplado de propiedades de los polímeros electroactivos (PEA).*

Por una parte, tras numerosos estudios realizados se han encontrado problemas para inducir deformaciones notables con campos eléctricos de baja intensidad [4], [14], lo que ha llevado en muchas ocasiones a requerir que el material se encontrase dopado [14], para apreciar el efecto de electrostricción. No obstante, en este caso, como el trabajo se ha centrado en el estudio del material puro, se ha prescindido de tal técnica.

Por otra, la viscoelasticidad [15], el comportamiento hiperelástico, la histéresis del material y la influencia de la temperatura son las causantes de las no linealidades mencionadas con anterioridad, las cuales tienen como consecuencia inmediata una dificultad en la predicción del campo de deformaciones, la cual es la causante de lo abstruso que resulta elaborar modelos predictivos del comportamiento de estos materiales.

### 1.1. Estado del arte: antecedentes y apoyos del estudio

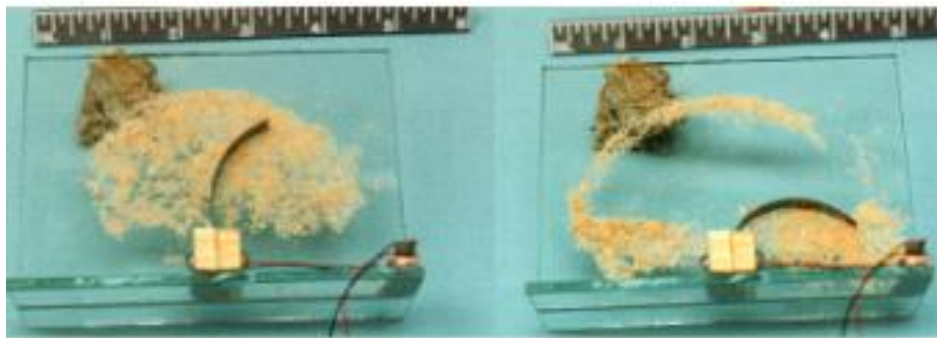
La electrostricción, la propiedad por la cual se varía la geometría de todos los materiales dieléctricos bajo la influencia de un campo eléctrico, ha sido ampliamente estudiada desde finales del siglo XX [4].

Asimismo, posteriores estudios centrados en el mismo fenómeno, revelaron importantes deformaciones en algunos dieléctricos (hasta el 215%) [5], lo que desató profundo interés en este campo surgiendo nuevas líneas de investigación desarrolladas simultáneamente.

Como es natural, por ser empleados los plásticos en múltiples aplicaciones de interés, existe numerosa bibliografía sobre las propiedades mecánicas de multitud de polímeros, y por supuesto, los PEA no son una excepción [11].

Siguiendo la línea establecida por los estudios iniciales sobre electrostricción y sobre las propiedades mecánicas de los PEA [4], [5], surgen multitud de prototipos y posibles aplicaciones en diferentes campos como se ha pincelado al comienzo de la memoria. De entre las aplicaciones más prometedoras destacan algunas probadas y otras con sólida investigación que las respaldan.

Un ejemplo de aplicación poco convencional fue la construcción de un limpiaparabrisas para vehículos de exploración espaciales basado en una lámina de material electroactivo que se desplazaba con un movimiento oscilante sobre la lente del robot de exploración en el que prestaba servicio, consiguiendo así un sistema para limpiar la lente sin necesidad de involucrar bastidores complejos, sistemas de transmisión y otros componentes mecánicos habituales en los sistemas convencionales, logrando evitar depender de la fiabilidad de los citados componentes y sentando involuntariamente precedente para su aplicación en nuevos campos [8].



*Fig. 1.2: Limpiaparabrisas ejecutado usando un PEA [8].*

Otra de las tentativas de proyecto que radican en la elaboración de actuadores más sencillos para el campo de la robótica (prescindiendo de sistemas de transmisión y control complejos como los tradicionales), son algunos de los prototipos de sistemas de manipulación de muestras basados en pinzas compuestas con este tipo de materiales.



Fig. 1.3: Actuador compuesto de polímeros piezoeléctricos [8].

En lo referente a futuros usos, huelga mencionar las numerosas aplicaciones para las que se están investigando estos polímeros. En el caso de los elastómeros dieléctricos, sus potenciales usos se circunscriben entorno a los campos de la medicina, la inteligencia artificial y la simulación mediante la elaboración de prototipos.

En el campo médico, destacan las aplicaciones en micro-fluidos, por ejemplo para su empleo en dispositivos de asistencia ventricular o LVAS [16]. Además, dada la buena biocompatibilidad de ciertos elastómeros dieléctricos, se está estudiando la posibilidad de elaborar prótesis sustitutivas de músculos y otros tejidos biológicos compuestas con estos materiales [17].

En el caso de la inteligencia artificial, el uso de estos polímeros parece ser que se orienta a la elaboración de una piel artificial [18], debido a su capacidad electro-activa y similitud con consistencia de la piel humana lo cual se hace notar a través de sus propiedades organolépticas, como el tacto.

Asimismo y como ya se ha mencionado, los actuadores sin motores y con diseños más minimalistas, conocidos generalmente en la literatura como músculos artificiales, [19] se acercan más a lo posible gracias a estos materiales.

Por último y en lo referente a la construcción de modelos de prueba, cabe decir que existen ciertos materiales, como el VHB® que se están empleando actualmente para simular las propagaciones y la capacidad de absorción de los impactos en tejido blando, lo cual es útil en simulaciones de asistencia a la cirugía, estudio del daño, etc. [20].

Tampoco se han de olvidar las aplicaciones más comunes de los PEA, que, aunque menos espectaculares o novedosas, cumplen funciones como sustitutos de las tecnologías convencionales de la manera más eficaz. Algunos ejemplos de aplicaciones más generales son:

- Botoneras íntegramente fabricadas en plástico (Piezosensibles).
- Alfombrillas de seguridad para automatización (Piezosensibles).
- Componentes para aviónica y aeronáutica.
- Hidrófonos y equipos de ultrasonidos.
- Transductores de propósito general.

Además de cumplir otros propósitos no relacionados con la piezoelectricidad o la electrostricción, son habituales en el mercado industrial los tubos termo-retráctiles o impermeabilizantes industriales compuestos de piezoeléctricos, como el polifluoruro de vinilideno (PVDF) [21], lo que atestigua su gran presencia en el panorama industrial actual.

En general, estos polímeros se pueden encontrar repartidos entre todos los campos tecnológicos. Por ejemplo, abajo se muestra la distribución de las principales aplicaciones piroeléctricas y piezoeléctricas de los polímeros [21]:

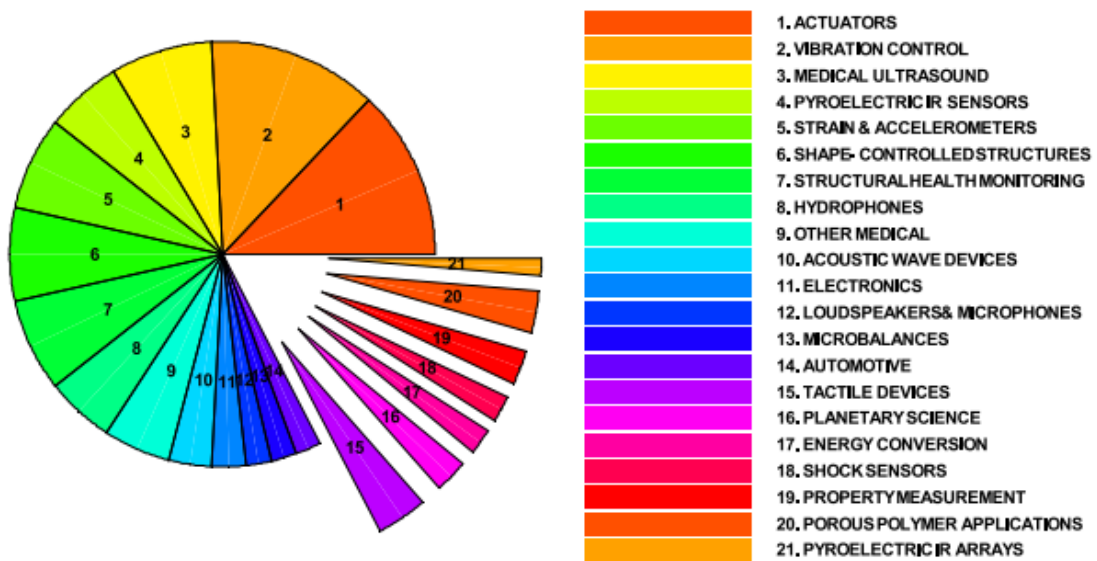


Fig. 1.4: Diferentes aplicaciones piezoeléctricas y piroeléctricas de los polímeros [21].

No obstante, casi la totalidad de las aplicaciones más novedosas y prometedoras han surgido de manera heurística, frutos de ensayos de prueba y error, debido a que no existe un modelo predictivo que recoja el comportamiento de estos materiales.

Cierto es, que existen buenas aproximaciones a la realidad en situaciones eventuales, es decir, para determinadas configuraciones de carga o trabajo, para determinadas geometrías, etc. Por ejemplo, existen ya trabajos con positivos resultados en la estimación de parámetros para modelización basados en modelos como los de Mooney-Rivlin [22] o el hiperelástico de Ogden [15].

Pero, desgraciadamente, los modelos están resultando no ser extrapolables entre polímeros de diferente naturaleza, ya que las propiedades de relajación, endurecimiento y conductividad entre otras, tienen su origen en gran parte en la naturaleza intrínseca del material que viene dada por su composición específica (química) del material [23].

Por ello, estos materiales se están estudiando actualmente de manera compartimentada, uno por uno y aplicación por aplicación, con múltiples posibilidades resultantes de la combinación de material, geometría, esfuerzos a soportar, entorno, etc.

Todo esto da pie a suponer la necesidad de un estudio más profundo de las propiedades de estos materiales para así acelerar su avance.

Es aquí donde el presente documento está fundamentado y donde se busca, por medio del trabajo elaborado, realizar un aporte original sobre el panorama actual.

## **1.2. Propuesta del estudio y aportaciones originales**

Como ya se ha expuesto, la parte menos sólida de la caracterización de estos materiales, es la que se encuentra a medio camino entre las propiedades de diferente naturaleza, lo que resulta en hallar una complejidad elevada en el diseño de controladores de los posibles actuadores ejecutados en estos materiales, por ello se ha planteado el estudio de un material representativo de una conocida familia de los PEA: los elastómeros dieléctricos, habiendo sido elegido para experimentación un elastómero acrílico de denominación comercial VHB49®, ya que ha sido necesario particularizar el estudio centrándolo en un solo material debido a las peculiaridades comentadas en el apartado anterior, es decir, debido a la poca generalización que se puede hacer sobre estos materiales.

El VHB49® de la marca estadounidense 3M®, obtuvo notable fama cuando los estudios sobre la deformación de muestras de este material en pruebas de electrostricción arrojaban valores del 215% [5], de nuevo y como muchos PEA, barato y también disponible en formato comercial. Vendido como cinta adhesiva multi-propósito, es fácilmente adquirible y manipulable para realizar las pruebas pertinentes.

Este material, de composición química no revelada por 3M®, ha sido elegido por ser el más estudiado hasta la fecha, siendo el que cuenta con mejores tasas de deformación por aplicación de campo eléctrico y con una buena bibliografía que le soporta.

Por todo lo anterior, dicho elastómero goza de gran interés académico e industrial con gran proyección en el desarrollo de los PEA.

Debido a lo complejo del problema, se ha optado por intentar acercarse a una solución heurística para el material, deseando que los criterios establecidos para alcanzar dicha solución sí sean extrapolables a aquellos materiales en los que el modelado no sea una opción disponible en el futuro inmediato.

Asimismo, se espera que los resultados obtenidos, arrojen luz sobre el todavía muy desconocido comportamiento general de los elastómeros dieléctricos.

Dada la dificultad de realizar ensayo puramente acoplado para la observación de propiedades de diferente naturaleza de manera conjunta, se ha optado por estudiar las propiedades del material una por una, permaneciendo el resto de ellas invariantes.

Por la naturaleza de sus potenciales y futuros usos, se ha visto necesario estudiar cómo una propiedad alterada en el pasado afecta a sus propiedades presentes, es decir, se ha requerido comprobar la historia térmica y mecánica del material y su relación con otras propiedades.

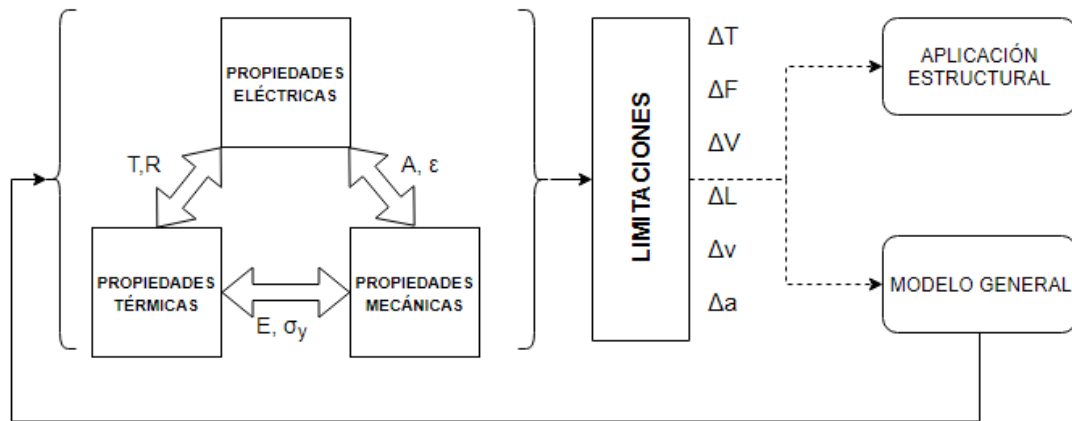


Fig. 1.5: Esquema del planteamiento metodológico del problema planteado.

En la figura 1.5, se puede observar el abordaje propuesto del problema general en los PEA, el cual servirá como punto de partida. Tras experimentos iniciales de caracterización básica y calibración, y la consulta de la bibliografía ya citada, se ha podido comprobar como las propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas se modificaban entre ellas.

La interrelación de las propiedades es una de las causas principales culpables de que un modelo general para un PEA en concreto está todavía lejos de obtenerse. La explicación es algo más trivial, y se puede explicar fácilmente mediante un ejemplo:

Sea un hipotético músculo artificial compuesto de VHB®, el cual se ha recubierto de grasa carbón para mejorar su conductividad y al cual se le ha adherido una malla de electrodos a dos caras opuestas del material como se muestra en la siguiente imagen:

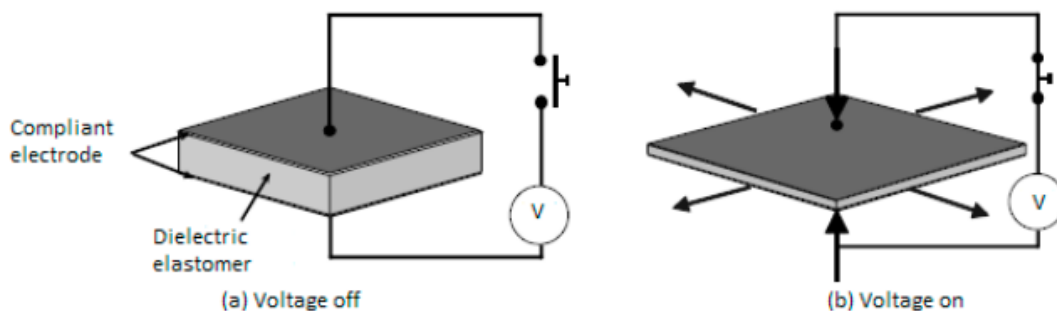


Fig. 1.6: Ilustración en la que se aprecia el estado de relajación (a) y el de paso de corriente (b) [17].

Como se muestra, el desplazamiento lo experimentará en la dirección de las flechas, ahora bien, ante un cambio de velocidad de deformación por necesidades de operación, se produce un endurecimiento del material, afectando al límite elástico  $\sigma_y$ , y a la capacidad y tiempo de relajación del material, los cuales vienen gobernados por el efecto de la visco-elasticidad y un efecto denominado Mullins [15], los cuales se

introducirán pormenorizadamente más adelante. Paralelo a esto, la constante dieléctrica  $\epsilon$ , varía en función de las deformaciones inducidas.

A su vez, un aumento de la intensidad de corriente para realizar un movimiento más rápido o más potente, produce un aumento de la temperatura  $T$  en el seno del material dado por la ley de Joule, el cual a su vez produce un aumento de la resistencia eléctrica  $R$ , afectando al control de la corriente que ingresa al material.

Asimismo, es necesario tener en cuenta que a unas deformaciones elevadas, la reducción de área transversal es considerable en estos materiales (el VHB® tiene un coeficiente de Poisson de 0.49), lo que de nuevo afecta a la disipación del calor generado por el paso de corriente y a otras propiedades mecánicas como la relajación de la tensión, o la fluencia lenta (la deformación progresiva a carga constante), en inglés *creep* [23].

Además, de nuevo el aumento de  $T$ , provoca un reblandecimiento del elastómero afectando a la elasticidad y al límite elástico cerrando el ciclo [22].

Por todo lo anterior, es complicado predecir el comportamiento no en una configuración general, sino ya en el más simple ensayo de tracción pura.

Debido a esto, el objetivo general del trabajo consiste en la evaluación de las propiedades mecánicas, centrándose especialmente en su relación con el resto de propiedades para poder comprender mejor el material y obtener datos interesantes para su posterior aplicación en futuros esfuerzos investigadores.

Las propiedades mecánicas del material son la piedra angular en el diseño de actuadores electromecánicos, pues el sistema de control correspondiente generalmente obtiene información de la respuesta del material a estímulos, por lo que es importante conocer los mecanismos que rigen dicha respuesta para poder predecir el comportamiento nominal del material.

Es importante estudiar paralelamente la interrelación de las propiedades mecánicas con las propiedades térmicas, pues estas, como ya ha quedado constatado, son un importante puente entre las propiedades eléctricas y las mecánicas. Asimismo, la sola dependencia de las propiedades mecánicas de la temperatura, hacen interesante el estudio del comportamiento del material a diferentes temperaturas.

Específicamente, se ha buscado encontrar factores clave en la modificación del comportamiento mecánico para así poder acotar los futuros umbrales de trabajo y limitaciones de funcionamiento en los que se encuentre el elastómero.

Con las limitaciones en cuenta y de manera heurística, se puede simplificar bastante el control de una aplicación en concreto, o, futuramente, desear que sirvan las conclusiones como punto de apoyo para avanzar en la modelización general de este material.



### **1.3. Hipótesis y objetivos**

La metodología establecida plantea unas hipótesis de partida desde las que se deducen, apoyándose en los fundamentos teóricos necesarios, unos objetivos generales a cubrir por el proyecto mediante el desarrollo de experimentos. Una vez desarrollados los experimentos, el análisis de los datos obtenidos se espera que aporte información para la elaboración de la solución tentativa aplicada al problema.

#### **1.3.1. Hipótesis de partida**

1. Las estructuras compuestas de polímeros electro-activos y/o aquellas que sean también de naturaleza polimérica similar, tienen características y aplicaciones interesantes para su aplicación en multitud de campos como la medicina o la robótica.
2. Las características y aplicaciones anteriormente citadas están en un proceso de estudio y desarrollo aletargado debido a los problemas naturales de estos materiales: los campos de deformaciones abstrusos, el problema de la viscoelasticidad, la variabilidad de comportamiento con la temperatura generada por la corriente eléctrica, y las peculiares propiedades mecánicas y eléctricas.
3. El factor determinante la respuesta de los potenciales actuadores u otras aplicaciones similares desarrolladas mediante esta tecnología es el comportamiento mecánico, que lidia entre la respuesta deseada y la respuesta real del actuador.
4. Dicho comportamiento mecánico, modifica y se ve modificado por los bloques de propiedades eléctricas y térmicas los cuales se interrelacionan por mecanismos como el efecto de la electrostricción o el reblandecimiento a temperaturas elevadas. Por todo ello, es necesario definir correctamente las propiedades mecánicas del material frente a ciertos cambios del entorno y frente a la respuesta de ciertos estímulos.
5. La variación de las propiedades mecánicas con la temperatura es un foco interesante de estudio que puede, además de aportar información del comportamiento mecánico, esclarecer conceptos sobre la frontera electro-mecánica del material.
6. La solución buscada en el trabajo pasa por el estudio de las propiedades mecánicas básicas del material y su variación en el tiempo, pues ya existen caracterizaciones mecánicas y eléctricas de dichos materiales, pero no se encuentran específicamente orientadas a aportar unos rangos de utilización o de estabilidad del material.

De estas hipótesis planteadas se desprende el objetivo general que en este estudio se plantea.



### 1.3.2. Objetivo general

Se busca realizar la caracterización experimental del material, por medio de diversas pruebas, poniendo el foco de estas en la influencia de la memoria mecánica y térmica de estructuras tipo probeta de VHB49®; incluyendo en el estudio los efectos de la degradación de las propiedades mecánicas anteriormente citadas.

Se considerará la influencia de la orientación del material, la temperatura, velocidad de deformación y tipos de solicitaciones en las propiedades del material.

Paralelo a esto, se tendrá en cuenta en la caracterización del material los efectos inherentes a la naturaleza visco-elástica del material, de los cuales destacan: la histéresis, la relajación de la tensión a deformación constante, y el efecto Mullins.

Es importante comentar, que los métodos experimentales desarrollados, han sido elaborados desde cero, pues no existen precedentes en la literatura actual que indiquen como proceder para la caracterización de un material con características similares.

Tanto el histórico del instrumental empleado, como del material ensayado eran desconocidos hasta el momento de la realización del trabajo, y por ello, es importante plantear como objetivo general el establecer una metodología eficaz que permita obtener información clave del comportamiento del material.

### 1.3.3. Objetivos específicos

1. Estudiar las propiedades mecánicas del material con aplicaciones directas sobre el modelado o la construcción de prototipos.
2. Estudiar cómo de la historia mecánica afecta a las propiedades mecánicas.
3. Estudiar cómo la historia térmica afecta a las propiedades mecánicas.
4. Desarrollar una metodología experimental escalable a otros tipos de elastómeros dieléctricos.

### 1.4. Estructura de la memoria

Expuesta la motivación del trabajo y el estado del arte, a continuación, se desarrollan en las siguientes páginas los **métodos** empleados para la consecución de los objetivos planteados. Dentro de este capítulo, se enlista la descripción de los experimentos realizados y se discute su adscripción a un **marco regulador** sobre el que se sostiene la rigurosidad de las pruebas.

Además, se ha intentado hacer alusión a los fundamentos teóricos pertinentes que dan solidez a las hipótesis planteadas y a otros conceptos que han surgido a lo largo del trabajo. Debido a la naturaleza experimental del estudio, se ha evitado un enfoque puramente teórico o con una separación muy evidente entre teoría y práctica para lograr un texto de lectura fácil y poco árido.

Tras el capítulo de métodos, se sucede el de **resultados**, en el cual se muestran los datos obtenidos directamente de las pruebas experimentales realizadas.

El capítulo siguiente, el de **estudio de los ciclos de histéresis**, se ha dedicado a la extracción de datos más complejos a partir de los obtenidos por los ensayos correspondientes a las cargas y descargas, al no ser estos datos directamente derivados de los métodos empleados y al requerir de cierta matemática, no forman parte de los resultados originales sino más bien son consecuencia del análisis de los primeros, por lo que se les ha dedicado el citado capítulo.

Finalizado el análisis de los datos, en el apartado de **análisis de resultados**, se exponen y discuten los resultados obtenidos a partir de la observación directa, por medio de los métodos empleados, y del análisis derivado, empleando para ello diversas herramientas matemáticas.

El último capítulo del cuerpo del trabajo está dedicado a la las **conclusiones** alcanzadas, donde además, se presentan unas deducciones derivadas de ellas, así como la valoración de su posible **impacto socio-económico** y un planteamiento de posibles trabajos futuros continuando esta línea de investigación.

Finalmente, y tras las referencias citadas en el cuerpo del trabajo, se enlistan como es costumbre, los diferentes anexos de carácter técnico que complementan el trabajo. Entre ellos figuran las hojas de características de los materiales empleados, así como la normativa en torno a la que se adscriben las pruebas realizadas para su determinación.

Con intención de mejorar la repetitividad de los ensayos realizados y aportar una idea del tiempo empleado en el estudio, se ha agregado también un [diagrama de Gantt](#), conteniendo este las tareas realizadas para la elaboración de este trabajo y sus periodos de realización.

## 2. MÉTODOS Y EXPERIMENTACIÓN

Como ya se ha mencionado en el subcapítulo [1.2](#), el estudio se ha centrado en una variante comercial de un elastómero dieléctrico perteneciente a los PEA, la cual se ha sometido a diferentes pruebas para lograr su caracterización.

La caracterización ha sido realizada de manera generalista, es decir, estudiando diferentes propiedades relacionadas entre sí mediante pruebas englobadas en bloques, donde cada bloque se centra en unas propiedades concretas del material.

Posteriormente se han relacionado los resultados obtenidos en cada bloque por separado con el objetivo de tratar de dar un acercamiento factible al problema de la figura [1.5](#).

El primer bloque, de caracterización básica, busca confirmar la hipótesis presupuesta de material hiperelástico [\[15\]](#) obteniendo las curvas tensión-deformación del material a diferentes velocidades de deformación en un ensayo de tracción uniaxial. Por otra parte, se estudian las propiedades mecánicas a tracción en un ensayo transversal.

El segundo bloque, de caracterización avanzada, se centra en el estudio de las propiedades dinámicas del material, concretamente en su peculiar respuesta a la deformación, dada por la viscoelasticidad, dicha respuesta se ha estudiado a bajos y a altos ciclos para obtener el comportamiento a fatiga del material.

Además, se ha estudiado el conocido efecto Mullins, el cual se da en elastómeros blandos del tipo gel entre otros, dicho efecto cobrará especial importancia para ciertas aplicaciones, la cual se discutirá más adelante. Asimismo, se han estudiado los efectos de los diferentes mecanismos de histéresis en el material.

En el tercer bloque, se ha estudiado la variación de la respuesta del material frente al tiempo, un ensayo de relajación ha sido necesario para estudiar los fenómenos de relajación de la tensión a deformación constante. Además, se ha estudiado la respuesta a diferentes controles de posición. Se ha incorporado también al bloque el estudio de la influencia de la memoria mecánica del material sobre sus propiedades mediante ensayos de fatiga.

Por último, en el cuarto bloque, se ha estudiado el comportamiento del material en diferentes rangos de temperatura. El objetivo de este bloque es el de comprobar la capacidad de recuperación del material frente a cambios en su historia térmica. Para ello, se ha realizado un ensayo a temperatura por encima del rango de utilización normal del material y un ensayo a temperatura por debajo de dicho rango.

## 2.1. Marco Regulador

Para mantener la rigurosidad de las pruebas en todo momento, el proyecto se ha orientado gracias a una serie de normas comúnmente utilizadas en la caracterización de este tipo de materiales.

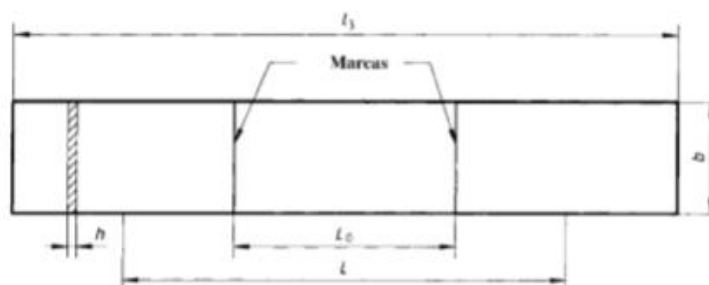
Para la determinación de las propiedades a tracción en láminas poliméricas se ha seguido la norma ISO 527: 2012, denominada en español, *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción*. Esta ha sido aplicada en los apartados [2.4](#) y [2.5](#).

Concretamente, han sido especialmente tenidos en cuenta los apartados ISO 527-1, el cual detalla los principios generales de la norma, y el ISO 527-3: 1995, que ahonda en las condiciones de ensayo para películas y hojas. Ambas dos vigentes en el momento de la edición de este documento, desde 2012 y desde 1995 respectivamente,

Cabe decir que estas han sido revisadas con fecha última mayo de 2018 la primera parte, y en octubre de 2015 la tercera, según la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

De la ISO 527-1, han cobrado especial protagonismo los apartados: 3, de donde se han obtenido los términos y nomenclatura empleados, 4, del cual se han extraído los principios y métodos a seguir y el 7,9 y 10, de donde se ha extraído la información necesaria para el tratamiento de los resultados.

De la ISO 527-3, se han extraído la geometría de las probetas y las dimensiones aconsejables de estas, resultando la geometría a emplear para los ensayos de tracción de esta forma:



- $b$  Anchura: 10 mm a 25 mm
- $h$  Espesor:  $\leq 1$  mm
- $L_0$  Distancia entre marcas: 50 mm  $\pm$  0,5 mm
- $L$  Distancia inicial entre mordazas: 100 mm  $\pm$  5 mm
- $l_3$  Longitud total:  $\geq 150$  mm

Fig. 2.1: Probeta a emplear: Tipo 2 de ISO 527-3 [\[24\]](#).

La elección de la geometría se debe a la dificultad de ejecutar los contornos necesarios en otros patrones, los cuales tienen radios de acuerdo difíciles de recortar en este tipo de material con las herramientas de corte disponible, por lo que se ha optado por simplificar la geometría de ensayo empleando la probeta tipo 2.

Teniendo en cuenta estas dimensiones, se han elegido y preparado las muestras a partir del formato adquirido, para hacerlo conforme normativa, se han preparado in situ en los momentos previos a la realización de las pruebas conforme dicta el apartado 9.1 de la parte primera de la norma ISO 527.

Es cierto, que, por limitaciones del equipo empleado, se ha necesitado ensayar varias probetas a la vez para poder registrar fuerza, ya que la célula de carga no es suficientemente sensible como para medir la fuerza que actúa sobre una sola probeta. Por ello, se han realizado probetas con un apilado de siete capas de probetas tipo 2 de la ISO 527-3.

No obstante, la técnica de apilado de capas para la realización de probetas es común encontrarla en la bibliografía dedicada a estos tipos de estudio, además, dicha modificación permite aproximarse más al hipotético comportamiento real del material, ya que este tipo de materiales suelen agregarse de esta manera para las diferentes aplicaciones.

Los ensayos a tracción transversal en cambio no cumplen con tanta rigurosidad la norma, sino que se usa como referencia. Se ha usado el mismo procedimiento que en los ensayos de tracción uniaxial, pero con una probeta más corta para que cupiese en las mordazas. Por otra parte, las mordazas empleadas han sido fabricadas a medida para este ensayo, no siguiendo estas una normativa específica.

Los ciclos de carga-descarga y los estudios de relajación, emplean el mismo instrumental y la misma técnica que dicta la norma ISO 527 para conseguir homogeneidad en los datos a contrastar, no obstante, al ser la naturaleza del ensayo diferente, se detallan cuidadosamente en su apartado correspondiente los parámetros necesarios para definir el experimento.

Para el estudio a alta temperatura no se ha seguido ninguna normativa en concreto (aunque sí se han empleado como referencias las normas ASTM D573, 2015 y ASTM F1980, 2016), pues si bien existe normativa relacionada con la técnica, no era necesario elevar la prueba a tanta complejidad, ya que simplemente se buscaba una respuesta del material inmediata, y no realizar un ensayo de envejecimiento acelerado al completo.

Lo mismo sucede con los ensayos a baja temperatura, donde no se buscaba obtener unos valores orientados a la normalización, sino más bien una referencia aproximada del comportamiento en estos rangos de temperatura.

Para evitar inducir a error, cabe decir que las propiedades del material empleado (VHB® 4910F), que figuran en el anexo A al final de este documento, han sido determinadas por terceros, los cuales han empleado una normativa diferente, de la *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Para más referencias, se ruega consultar las tablas de características pertinentes en dicho anexo.

Por último, comentar sobre las normas referenciadas, que estas están orientadas para certificaciones y demás procedimientos de normalización, pero no se han seguido con tales fines sino más bien con los de tener una referencia con la que cotejar los resultados y procedimientos del presente trabajo con aquellos previamente realizados por otros autores.

## 2.2. Instrumental empleado

En el presente subcapítulo, se relaciona el instrumental empleado en la parte experimental del trabajo junto con sus características más peculiares.

### 2.2.1. Ensayos de tracción longitudinal

Para los ensayos de tracción mecánica se ha empleado una máquina de ensayos universal SERVOSIS ME401/1, con una célula de carga de 10 KN. Al no poder disponer de una célula más sensible y con un menor ancho de escala y de otro tipo de máquina de ensayos, existen ciertas limitaciones en la realización de experimentos:

1. Debido al corto recorrido del pistón del que dispone la máquina, la muestra no se ha podido llevar a rotura bajo ninguna configuración de las ensayadas.
2. Debido a la baja carga medida por la célula en relación a su ancho de escala, la frecuencia de muestreo ha tenido que ser tomada relativamente baja durante la realización de las pruebas para evitar medir ruido poco significativo.
3. Como se ha comentado ya en el subcapítulo dedicado al marco regulador, las probetas han tenido que ser incrementadas varias veces en grosor respecto de la geometría de la normativa para conseguir medidas fiables debido a la célula de carga.

La máquina en cuestión es la siguiente:



Fig. 2.2: (1) Mordazas para fijación de la muestra, (2) Ordenador, (3) Monitor, (4) Módulo analógico de toma de datos.

De cara al tratamiento de datos obtenidos del trazador de esta máquina, se ha procurado que la frecuencia de muestreo de cada experimento sea tal que se obtenga aproximadamente el mismo número de muestras en cada uno, por ello, la frecuencia se ha estimado mediante la siguiente relación:

$$f_s = \frac{Nv}{X} \quad (2.1)$$

Donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo,  $N$ , el número de muestras deseado por prueba,  $v$ , la velocidad del ensayo en milímetros por segundo y  $X$ , el espacio recorrido por el pistón en milímetros. Cumpliendo la igualdad, se consigue que todos los ensayos tengan la cantidad de muestras deseada para homogeneizar las pruebas.

### 2.2.2. Ensayos de tracción transversal

Para los ensayos de tracción transversal, se ha empleado la misma técnica que la utilizada en los ensayos de tracción longitudinal, con la excepción del sistema de fijación. En lugar de usar las mordazas de la máquina, se ha tenido que emplear un útil de fijación especialmente diseñado a tal efecto. El empleo del útil ha sido necesario para poder fijar la muestra transversalmente, ya que la mordaza original no era capaz de fijar las muestras satisfactoriamente sin que se produjeran deslizamientos. Además, este útil posee un ancho mayor que facilita la colocación de las probetas.

El útil en cuestión, está compuesto de dos cabezales, uno para cada acople de la máquina (marco y pistón móvil), la muestra se fija mediante el trabamiento entre dichos cabezales y unas placas unidas a estos mediante cuatro tornillos cada una.



*Fig. 2.3: Detalle del útil de fijación, donde se aprecian las placas con sus tornillos.*



A las caras internas de los cabezales y las placas, se les ha mecanizado un moleteado para evitar que las muestras deslizaran. Además, los bordes de las placas están biselados para evitar posibles efectos de cizalladura en las probetas una vez fijadas. En el anexo B al final del documento se puede disponer de los planos del útil.

### 2.2.3. Ensayos de comportamiento a alta temperatura

Para realizar el tratamiento térmico en un entorno controlado, se ha empleado una cámara climática INSTRON CEAST con un controlador EUROTHERM modelo 808 con una sensibilidad de  $0.1^{\circ}\text{C}$  sobre un ancho de escala que recorre desde  $-250^{\circ}\text{C}$  hasta  $250^{\circ}\text{C}$  en la configuración empleada según constata el fabricante [25].



Fig. 2.4: (1) Cámara climática, (2) Termopar auxiliar, (3) Controlador de temperatura, (4) Módulo de control general.

Dicha cámara posee un termopar adicional para controlar que la temperatura se distribuya uniformemente, Dicho control se simplifica al obtener la temperatura de dos puntos distanciados entre sí.

Por funcionar el controlador como un sistema de segundo orden [25], el tiempo de establecimiento fijado ha sido relativamente lento, de aproximadamente una hora, con el objetivo de que la temperatura no sobre oscile pasando por encima de la temperatura promedio deseada durante el tratamiento.



#### 2.2.4. Ensayos de comportamiento a baja temperatura

Para la realización de las pruebas a baja temperatura, se ha empleado un refrigerador-congelador convencional de uso doméstico con capacidad para alcanzar y mantener los  $-24^{\circ}\text{C}$  (249 K).

#### 2.3. Preparación y manipulación de muestras

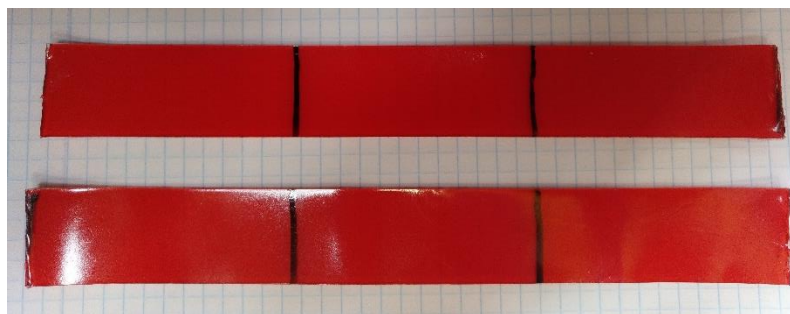
Para todos los ensayos se ha empleado el mismo formato de VHB®, siendo el elegido el VHB 4910F por ser aquel con las medidas óptimas para adaptarlo a la norma ISO 527.

Esta cinta tiene unas dimensiones de 19 mm de ancho y 1mm de espesor, además está disponible en varias longitudes. Es un material transparente y viscoso, con una difícil manipulación, presenta grandes deformaciones durante su manipulación que posteriormente es capaz de recuperar íntegramente la mayoría de las veces.

Para la preparación de probetas se ha cortado la cinta sobre un patrón dibujado en un papel milimetrado, posteriormente se ha cortado del rollo usando un cúter y se han apilado siete tramos para formar una probeta realizando la operación cuidadosamente para evitar pliegues, ya que una vez puestos en contacto, no es posible separarlos sin dañarlos.

El VHB® es bastante pegajoso y es complicado trabajar con él, pero por el contrario es fácilmente impregnable de cualquier polvo fino, lo que hace que reduzca la adherencia facilitando su manejo. Otra opción es el uso de guantes de nitrilo, ya que como se ha comprobado, el material presenta mucha menos adherencia sobre el nitrilo que sobre la piel.

Para realizar el corte se recomienda no eliminar la cubierta protectora, ya que evita que el material se adhiera a la superficie de trabajo al aplicar presión por el corte. Por el contrario, el marcado para el control de la longitud se puede realizar fácilmente con cualquier rotulador indeleble directamente sobre el VHB®.



*Fig. 2.5: Probetas recortadas para tracción longitudinal, el VHB se encuentra en la cara superior, pero al ser transparente se puede observar la cubierta protectora.*

Fundamentalmente, se han empleado dos tipos de probetas, las que aparecen en la figura anterior, para ensayos de tracción longitudinal, y las que aparecen en la figura siguiente, de menor longitud, las cuales son así para poder adaptarse al útil de fijación diseñado para los ensayos de tracción longitudinal:



*Fig. 2.6: Siete probetas sin recortar para el ensayo de tracción transversal.*

Adicionalmente, para comprobar la validez del estudio de tracción transversal, se ha fabricado una probeta más, con la misma geometría rectangular que las probetas de tracción longitudinal, pero con menor longitud para que pudieran asegurarse en el útil de fijación para ensayos transversales, esta mediría unos cincuenta milímetros, el cual es el ancho límite del útil.

A continuación, se incluye una tabla resumen con los tipos de probetas usadas para cada experimento:

ENSAYOS	DIMENSIONES l x a x p	APILADO
Longitudinales	100x19x7 mm	7 capas de 1 mm
Transversales	19x30x7 mm	
Transversales de repetición	19x50x7 mm	

*Tabla 2.1: Resumen de las dimensiones de probeta por naturaleza del ensayo.*

## 2.4. Caracterización fundamental

A continuación, se detallan los experimentos conducidos sobre el material para caracterizarlo de manera generalista en lo referente a su comportamiento a tracción.

### 2.4.1. Ensayo de tracción longitudinal

Los ensayos de tracción realizados se han planteado con doble finalidad. Por un lado, se pretende confirmar las hipótesis de partida, y por otro, estudiar diferentes configuraciones de las sollicitaciones externas para comprender mejor el material.

Por tratarse de un elastómero, se espera al menos confirmar que se cumpla en la muestra de VHB® la hipótesis de material hiperelástico, o material elástico de Green, o que al menos se aproxime bastante.

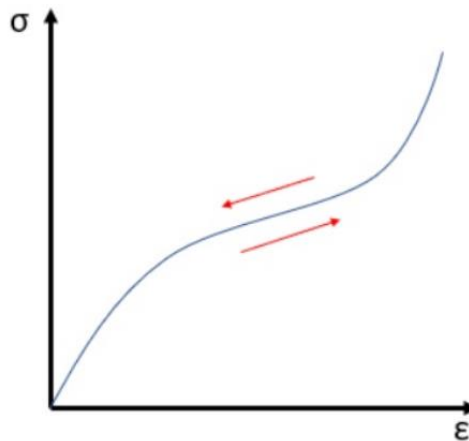


Fig. 2.7 Curva ideal de un material hiperelástico [26].

A diferencia de los materiales elásticos lineales, donde la tensión y la deformación están relacionados por la ley de Hooke, en este tipo de materiales posee tres zonas perfectamente diferenciadas en su curva, las cuales vienen dadas por el cambio de la curvatura de esta.

En los elastómeros, el comportamiento hiperelástico se puede explicar gracias a la respuesta de las cadenas moleculares a un esfuerzo de tracción.

En un primer estadio de la deformación, los mecanismos por los que se rige guardan relación con una rotación y realineamiento de las cadenas que se encontraban aleatoriamente ordenadas, ocasionando un gran desplazamiento inicial con bajos niveles de carga.

A continuación, si se sigue aplicando tensión se llega a una meseta donde se producen grandes elongaciones a una tensión casi constante, esto es debido a la elongación de las cadenas poliméricas previamente reordenadas.

Por último, antes de la rotura y debido a la extensibilidad de las cadenas, el material se endurece ocasionando menores deformaciones para un incremento de tensión mayor que en las etapas anteriores [27].

Como se puede observar, conocer si la muestra trabaja como un material hiperelástico es necesario e interesante, ya que las no linealidades que vienen dadas por este material son en gran medida las que dificultan el modelado.

Para confirmar las suposiciones, se ha practicado un ensayo de tracción longitudinal a diferentes velocidades, esto ha sido así para poder comprobar el endurecimiento del material y los posibles cambios de forma en las curvas confirmando así la literatura consultada [15], [22], [23].

El experimento se ha llevado a cabo a tres velocidades diferentes, a saber: 0.11, 1 y 5 mm/s para estudiar el comportamiento del material a muy baja velocidad, a baja velocidad y a alta velocidad respectivamente.

Para el cálculo de resultados, y conforme dicta la norma, se han usado tanto en el ensayo de tracción longitudinal como en el transversal los conceptos de tensión  $\sigma$  y deformación ingenieril  $\varepsilon$ .

La tensión se expresa como el cociente de la fuerza  $F$ , aplicada sobre la probeta en la dirección del estudio en cuestión (longitudinal o transversal) entre el área sin deformación  $A$  (medida antes del ensayo), la cual es perpendicular a la dirección de tracción de la probeta:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Por otro lado, la deformación ingenieril se expresa siguiendo el método A del apartado uno de la norma ISO 527, la deformación se obtiene dividiendo el incremento de longitud  $L_t$  entre las mordazas tras la realización del entre la longitud inicial  $L$  entre estas:

$$\varepsilon = \frac{L_t}{L} \quad (2.3)$$

La tensión se expresa en unidades de presión (kPa) y la deformación, al ser adimensional, se expresará de ahora en adelante en porcentaje.

La longitud inicial en todos los ensayos longitudinales entre mordazas  $L$ , ha sido de 55 mm por ser esta la longitud de partida mínima que permite colocar la probeta sin malearla en exceso.

Con un recorrido máximo disponible de 50 mm hacia abajo del pistón se puede obtener una deformación máxima alcanzable del 90,9%, por lo que se han obtenido deformaciones máximas idénticas en los demás ensayos en aras de la simplicidad para realizar comparaciones en igualdad de condiciones.

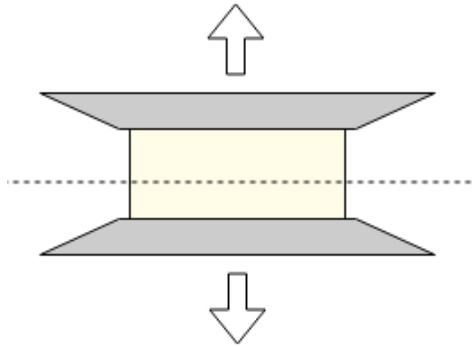
El área inicial considerada para el cálculo de la tensión ingenieril, ha sido de:

$$A (19x7) = 19 \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 0,000133 \text{ m}^2$$

Por otra parte, la frecuencia de adquisición de datos empleada en esta prueba ha sido de 16,67 Hz.

#### 2.4.2. Ensayo de tracción transversal

De forma paralela al ensayo de tracción longitudinal, se ha llevado a cabo un ensayo de tracción en la dirección transversal de la probeta como se muestra en la siguiente imagen, donde la línea de puntos representa la dirección longitudinal:



*Fig. 2.8. Montaje del ensayo de tracción transversal.*

Donde ahora la dirección ensayada es la transversal, realizándose sobre esta dirección un ensayo a tracción con una velocidad de desplazamiento 0,11 mm/s.

Para comprobar la repetitividad de la prueba, se ha realizado el ensayo múltiples veces sobre dos geometrías diferentes: 19x30x7 mm y 19x50x7 mm siendo las medidas: el ancho, el largo y el espesor de las probetas respectivamente.

La finalidad de este ensayo es la de esclarecer dudas sobre el comportamiento general del material, fundamentalmente motivado por las aplicaciones supuestas, como los músculos artificiales, ya que, en este tipo de aplicaciones, las configuraciones con pre estricciones y con tensiones en más de una dirección no son extrañas.

Otra de las posibilidades que ofrece este ensayo, es el estudio de la homogeneidad del material, pudiendo permitir la visualización de fenómenos de anisotropía entre otras cosas.

Al tener el material un tiempo de recuperación lento y estable para las grandes deformaciones, la colocación en las mordazas de la máquina ha sido relativamente simple, aun así, la probeta colocada en esta configuración es más propensa a resbalarse de la mordaza, necesitando un buen número de ensayos para obtener resultados satisfactorios.

Para el cálculo de resultados se han empleado las mismas expresiones y procedimientos que en el ensayo de tracción longitudinal. Cabe decir que la frecuencia de adquisición de datos ha sido de 100 Hz para el ensayo de longitud transversal, debido a las mayores variaciones observadas en la curva tensión deformación en esta configuración para un menor transcurso de tiempo.

Como el útil de fijación es diferente en los dos ensayos a comparar (longitudinal y transversal), y como obviamente la longitud de avance del pistón disponible en el caso del ensayo transversal es mucho mayor, se ha fijado el destino del pistón para alcanzar de nuevo un 90,9% de deformación conforme dicta la siguiente expresión:

$$\Delta L = \frac{\varepsilon(\%)_{\max}}{100} L \quad (2.4)$$

Donde  $L$  vuelve a ser la longitud inicial entre mordazas, con un valor de 5 mm para la prueba de 19x30x7, si  $\varepsilon(\%)_{\max}$  vale 90,9%, se busca un destino del ensayo ubicado a  $\Delta L=4,545$  mm por debajo del punto de partida. En el caso del ensayo sobre la segunda probeta (19x50x7) para la comprobación, se ha dado una  $L$  de 7 milímetros obteniendo un  $\Delta L=6,363$  milímetros.

Las áreas consideradas iniciales para el cálculo de las tensiones ingenieriles han sido:

$$A(30 \times 7) = 30 \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 0,00021 \text{ m}^2$$

$$A(50 \times 7) = 50 \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 0,00035 \text{ m}^2$$

## 2.5. Caracterización avanzada

Buena parte de la culpa de los fracasos en la predicción de los elastómeros a través de modelos hiperelásticos la tienen el efecto Mullins y el comportamiento viscoelástico de dichos materiales.

El efecto Mullins, que debe su nombre a Leonard Mullins, por ser él el pionero en estudiar este suceso el cual se da en elastómeros que preferentemente tengan una baja temperatura de transición vítrea y con compuestos inorgánicos añadidos, dichos materiales se conocen en inglés con el nombre de *filled rubbers* [15], [28-30].

Este efecto consiste en el cambio de la respuesta a la tensión de estos elastómeros tras una aplicación continua de ciclos de carga-descarga.

El material ve afectada su curva tensión-deformación dependiendo de la carga máxima previamente encontrada, lo que se traduce en un reblandecimiento irreversible del material, manifestándose un cambio de curvatura en los inicios de la curva tensión-deformación.

Este efecto ocurre siempre que la carga se incrementa respecto del primer valor máximo encontrado, aunque a veces, si la carga es menor, este efecto se puede despreciar y modelar el material como si tuviese un comportamiento puramente elástico y no lineal.

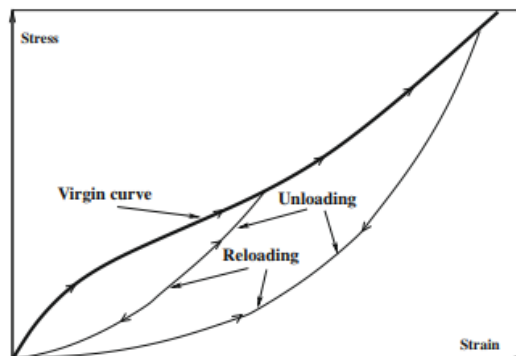


Fig. 2.9: Curva idealizada del efecto Mullins [28].

En la imagen anterior se aprecia cómo al realizar la primera carga, la curva que se dibuja es la más alta (*Virgin curve*), mientras que, al realizar una segunda carga tras haber alcanzado un valor alto previamente, las nuevas curvas cambian su curvatura y aparecen dibujadas por debajo de la original, indicando un reblandecimiento del material y permitiendo apreciar que ahora será necesaria menos tensión para lograr las mismas deformaciones obtenidas previamente [30].

Este efecto, el cual se sigue investigando actualmente, se supone que es originado debido al deterioro de las uniones entre las moléculas del elastómero, especialmente entre las moléculas inorgánicas que se les suelen añadir para mejorar sus propiedades [15].

Como se puede comprobar, la variación de la tensión necesaria para lograr deformaciones supone un efecto interesante que afectará a futuros diseños, por ejemplo. Al diseño de sistemas de control para músculos artificiales, entre otras cosas.

Otro aspecto casi opuesto a este, surge en este mismo material a partir del problema de la viscoelasticidad, por lo que merece la pena, prestarle un poco de tiempo al estudio de la reología del material.

En un material elástico, la deformación se recupera casi instantáneamente una vez se encuentra este en reposo de nuevo, pero al contemplar la componente de viscosidad del material, se puede observar como la velocidad de recuperación depende del tiempo.

Es fácil comprobar la viscoelasticidad del VHB®, basta con deformarlo con la mano simplemente para darse cuenta, de que, a bajas deformaciones se comporta de manera parecida a un muelle, y a grandes deformaciones es necesario esperar varios minutos, e incluso horas, para que se recuperen las dimensiones originales.

El modelo viscoelástico es complejo de estudiar debido a su dualidad, pero se han propuesto buenos acercamientos a raíz de este problema, partiendo del modelo de Maxwell, el cual representa el material con un componente elástico (muelle) en serie con un componente viscoso (amortiguador).

Para agregar el efecto Mullins, se ha añadido al modelo el mismo muelle con una constante elástica variable en paralelo, es decir, ahora el muelle tiene capacidad de dañarse, representando dicho efecto. Esto es una modificación del conocido modelo constitutivo de Bergström y Boyce [15], en el que se sustituye el muelle A, originalmente con constante elástica invariante, por uno con constante elástica dependiente del número de ciclos y la tensión previa alcanzada:

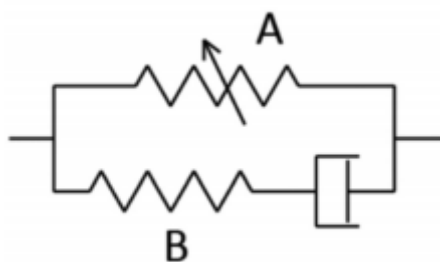


Fig. 2.10: Unidad elástica variable representando el efecto Mullins (A), y unidad de Maxwell representando el efecto viscoelástico remanente (B) [15].



Aunque el modelado no es objeto directo del presente estudio, sí que es necesario introducirlo para exponer la mayor problemática que aporta a los ensayos: la histéresis.

Debido mayormente a la viscoelasticidad, este material sufre de histéresis, es decir, la descarga se realiza a una tensión inferior que la carga, desvirtuando el modelo ideal hiperelástico de la figura 9, en la que la carga y la descarga se realizan por la misma curva.

La histéresis supone una importante disipación de energía, especialmente bajo los primeros ciclos de carga, lo que no hace sino enriquecer aún más el problema actual.

Los mecanismos de histéresis son variados, pero destacan entre ellos [31]:

- a) La fricción o viscosidad internas, originadas por el reordenamiento de las cadenas poliméricas bajo la carga aplicada.
- b) La cristalización, la cual aparece debido a las grandes deformaciones, las cuales originan zonas cristalizadas que continuamente se forman y destruyen.
- c) Un ablandamiento originado por el efecto Mullins.

Debido a todo esto, se ha diseñado un experimento para la observación de estos dos fenómenos, la histéresis y el efecto Mullins. La motivación original del experimento es la importancia que tienen tanto a nivel teórico como práctico.

El efecto Mullins parece ser un futuro problema para la construcción de sistemas de control simplificados sobre los actuadores, debido a la variabilidad de la fuerza necesaria para lograr una deformación consigna.

En cambio, la histéresis podría aportar a estos materiales en ciertos campos ventajas sobre otros, como por ejemplo en aquellas aplicaciones en las que se requiera absorber altas cantidades de energía.

Para estudiar los efectos de la viscoelasticidad, el efecto Mullins y la histéresis, se han diseñado los experimentos del presente bloque.

### **2.5.1. Ensayo de tracción longitudinal con múltiples cargas sucesivas**

Para intentar separar los efectos acoplados que se dan en la deformación de esta clase de materiales, se han conducido múltiples ensayos de tracción sobre la misma probeta de material, haciéndolo a varias velocidades se espera aislar el efecto Mullins y los efectos de endurecimiento debidos a la viscoelasticidad, pues el primero se supone independiente de la tasa de deformación [15], mientras que los mecanismos de la viscoelasticidad se hacen notar a elevadas tasas de deformación preferentemente, mostrándose estos muy dependientes del tiempo de recuperación entre ensayos.

El experimento se ha realizado como sigue: se ha tomado una probeta para tracción longitudinal compuesta de material virgen, y se han realizado sobre ellas cargas a tres velocidades diferentes (0.11, 1 y 5 mm/s) llevándolas a una deformación máxima del



90,9% (la máxima permitida por la máquina), el número de cargas mínimo realizado por ensayo ha sido de cinco por cada velocidad de deformación.

La prueba, ha sido realizada con dos ritmos de descarga, uno idéntico al ritmo de carga correspondiente, y otro a 1 mm/s para observar si el material empezaba a recuperar en presencia de tensión, es decir, si experimentaba una relajación importante.

La frecuencia de adquisición de datos empleada ha sido de 16,67 Hz.

### 2.5.2. Ensayo de tracción longitudinal con cargas sucesivas incrementadas

Una variante del experimento anterior para la observación aislada del efecto Mullins se ha llevado a cabo, esta consiste en el encadenamiento de cargas sucesivas alcanzando una carga cada vez mayor a la anterior.

Para ello, se ha programado una rutina de ensayos en la máquina como indica la siguiente tabla:

<b>CARGAS SUCESIVAS</b>	<b><math>V_{\text{carga}}</math>: 1 mm/s</b>	<b><math>V_{\text{descarga}}</math>: 1mm/s</b>
<b>ENSAYO</b>	<b>CARRERA (mm)</b>	<b>RECORRIDO (mm)</b>
CARGA 1	(0, -10)	10
DESCARGA 1	(-10, 0)	10
CARGA 2	(0, -20)	20
DESCARGA 2	(-20, 0)	20
CARGA 3	(0, -30)	30
DESCARGA 3	(-30, 0)	30
CARGA 4	(0, -40)	40
DESCARGA 4	(-40, 0)	40
CARGA 5	(0, -50)	50
DESCARGA 5	(-50, 0)	50
<b>RECORRIDO TOTAL (mm):</b>		<b>300</b>

*Tabla 2.2: Planificación del programa de cargas y descargas para la observación del efecto Mullins.*

Con los parámetros del experimento se ha configurado la adquisición de datos de la máquina teniendo en cuenta la cantidad máxima de muestras que es capaz de tomar, ya que el ensayo dura bastante tiempo, la frecuencia de adquisición de datos, calculada siguiendo la expresión 2.1 ha sido de:

$$f_s = \frac{Nv}{X} = \frac{5000 \cdot 1}{300} = 16,67 \text{ Hz}$$

### 2.5.3. Comportamiento a ciclos de carga y descarga de tracción simple

Un experimento simple para observar el ancho de histéresis (diferencia de área entre la curva de carga y la de descarga), consiste en el seguimiento de la evolución del material no solo durante la carga, sino registrando también la descarga asociada, la cual, se espera que genere una curva con un cambio de la curvatura respecto de la primera, quedando esta al mismo tiempo por debajo de la primera (lo que se traduce en una disipación de energía).

El experimento se ha conducido evitando factores de relajación debidos al mantenimiento de la posición final de la muestra, por lo que se ha tratado de que la máquina permanezca en reposo el menor tiempo posible una vez finalizada la carga.

CICLOS DE CARGA Y DESCARGA A TRACCIÓN SIMPLE	
TIPO DE PROBETA:	PARA ENSAYO LONGITUDINAL
NÚMERO DE CICLOS:	5
VELOCIDADES DE ENSAYO:	0,11 mm/s y 5 mm/s
TENSIÓN MÁXIMA ALCANZADA:	35 kPa (0,11 mm/s) y 60 kPa (5 mm/s)
DEFORMACIÓN MÁXIMA ALCANZADA:	90,9%
FRECUENCIA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	16,67 Hz

*Tabla 2.3: Parámetros del ensayo de ciclos de carga y descarga a tracción simple.*

La modificación de la deformación en el ensayo responde a una función triangular con la cota inferior de valor 0% y con la superior de valor 90,9%. Las funciones triangulares que gobiernan el programa de la máquina para las diferentes velocidades son las siguientes:

### Programa de cargas y descargas en tracción simple a 0,11 mm/s

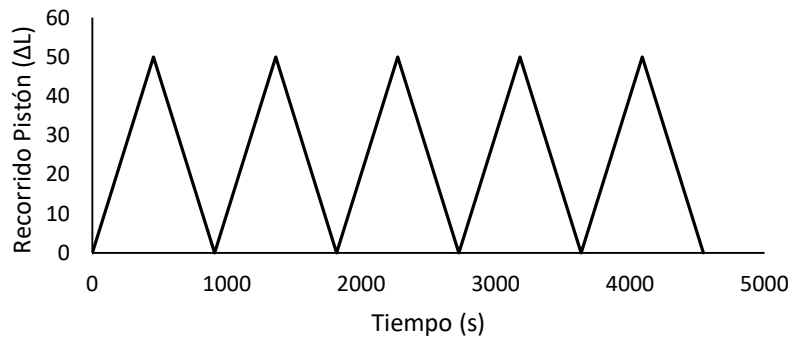


Fig. 2.11: Ciclo para cargas y descargas en tracción simple a 0,11 mm/s.

### Programa de cargas y descargas en tracción simple a 5 mm/s

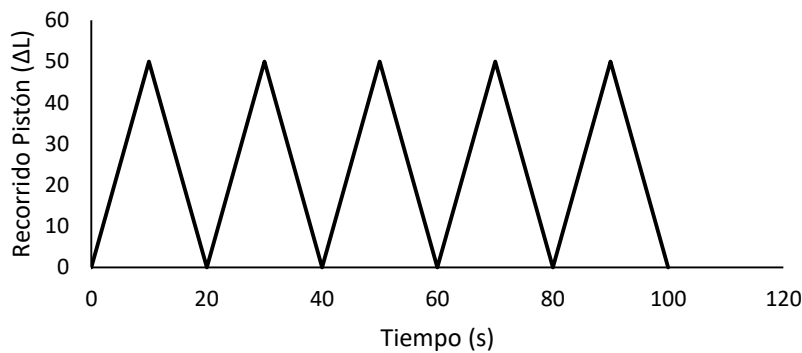


Fig. 2.12: Ciclo para cargas y descargas en tracción simple a 5mm/s.

#### 2.5.4. Comportamiento a ciclos de tracción y compresión

Como ampliación del experimento anterior, se ha diseñado un ensayo en el que la probeta sufra un ciclo de tensión alternante, lo que supone que el material, el cual parte con una pretensión dada, una vez dado de sí, entre en compresión a medida que el pistón retorna a la posición original.

Dicho experimento permite comprobar la variación entre los dos casos, el de tracción pura y el de tracción-compresión, observando posibles fenómenos de endurecimiento o de inestabilidad en el ancho de histéresis.

Para ello, una nueva probeta de material virgen ha recibido varios ciclos de tensiones máximas 13 kPa para 0,22 mm/s de velocidad de deformación y 35kPa para 10mm/s, y unas tensiones mínimas de -18 kPa para 0,22 mm/s y de -20 kPa para una velocidad de 10 mm/s.

En el caso del ensayo a 0,22 mm/s, la deformación ha seguido una función triangular de amplitud pico a pico 20 mm y periodo 90 segundos. La longitud inicial entre mordazas para este ensayo ha sido de 55 mm para permitir a la máquina completar el ciclo sin apretar la probeta contra la mordaza superior.

En el caso del ensayo a 10 mm/s, la máquina de ensayos ha seguido un programa controlado en posición, el cual como es lógico, obedece a la función:

$$x(t) = 55 - 10 \operatorname{sen} \left( \frac{\pi t}{2} \right) \quad \text{Con } x(t), \text{ en mm y } t \text{ en segundos.} \quad (2.5)$$

Al definirse el sentido negativo como el de bajada del pistón, se deduce que el ciclo primero empieza estirando el material, para luego comprimirlo en el siguiente semiperiodo. En este caso y por las mismas razones, la longitud de partida vuelve a ser de 55 milímetros.

Para evitar copar la memoria del trazador por la larga duración de este experimento, se ha muestreado a una frecuencia de 8,333 Hz para ambas velocidades.

## 2.6. Comportamiento del material frente al tiempo

Partiendo del problema de la viscoelasticidad mencionado anteriormente, toca ahora comentar otro fenómeno causado por esta, el *creep*, o fluencia lenta.

Este fenómeno se da en los elastómeros dieléctricos de forma generalizada, este consiste en el aumento de la elongación cuando el material se mantiene a una tensión constante.

Esto es debido al desenredado lento de las cadenas moleculares del material, y junto al efecto Mullins y a la histéresis, ocasiona de nuevo problemas para el diseño de los supuestos sistemas de control para estos materiales inteligentes. Este fenómeno hace inestable cualquier sistema de control, produciendo por ende, una respuesta impredecible [23].

El problema de la presencia de la fluencia lenta, puede ocasionar la rotura del material a carga constante con el transcurso un tiempo dado, lo que puede resultar crítico para ciertas aplicaciones [23]. Desgraciadamente, la máquina disponible para realizar los ensayos tiene ciertas limitaciones en el control en fuerza que impiden realizar un ensayo a tensión constante sin que la máquina exceda el recorrido máximo disponible.

No obstante, es necesario comentar su aparición debido a que esta está íntimamente ligada con otro efecto: el de relajación de la tensión o *stress relaxation* según la literatura inglesa, el cual se da en el caso contrario, cuando el material se mantiene a deformación constante, en este caso, el material “se relaja” ocasionando una rápida disminución en la tensión sufrida por este para una misma elongación.

Uno de los problemas a tener en cuenta en la elaboración de actuadores es la capacidad del susodicho de mantener una posición determinada por el sistema de control, para ello, es necesario conocer la progresión de la tensión y la deformación conforme avanza el tiempo.

Para adentrarse someramente en este problema, se han diseñado dos experimentos que estudian la tensión y la posición y los relacionan con el tiempo para determinados estímulos.

Por un lado, se ha realizado un ensayo de relajación, es decir, se ha mantenido la posición alcanzada tras deformar la probeta al 90,9% y se ha registrado la fuerza para observar qué sucede con ella.

Por otro lado, se ha obligado a la máquina a realizar de ciclos para observar cómo se desarrolla la fuerza ejercida al cumplir el control en posición con estos ciclos.

### 2.6.1. Ensayo de relajación

Para comprobar si existen efectos de relajación de la tensión, se ha diseñado un experimento en el cual se ha deformado una probeta del material a alta velocidad para, posteriormente, registrar la deformación sufrida contra el tiempo manteniendo la posición alcanzada durante toda la duración del ensayo.

Tras la obtención de los datos de posición y fuerza, (el primero para comprobar que se mantiene constante y el segundo para comprobar si existe variación), se ha obtenido la tasa de variación de la tensión con el tiempo, entendiéndose como la pendiente de la curva tensión-tiempo, dicha tasa, la cual se conoce en la literatura anglosajona como *Stress rate*, ha sido de nuevo graficada contra el tiempo para observar su variación. La tasa, medida en  $KPa \cdot s^{-1}$  se calcula como:

$$\dot{\sigma}(t) = \frac{\sigma(t)}{t} \quad (2.6)$$

La frecuencia de adquisición de datos definida para esta prueba ha sido de 16,67 Hz.

### 2.6.2. Estudio de la respuesta a diferentes impulsos

Como es característico en los actuadores de hoy día, se espera suponer que aquellos contruidos en este material tengan una respuesta predecible y controlable a los impulsos más comúnmente empleados en la ingeniería de control.

Para estudiar el comportamiento a un impulso, se han forzado varios ciclos de tracción con control de la deformación de diferentes formas:

- a) Un ciclo sinusoidal con un periodo de 100 segundos y una amplitud de  $\pm 20\%$  de deformación.
- b) Una señal cuadrada con un periodo de 90 segundos y una amplitud de  $\pm 20\%$  de deformación.

Posteriormente, se han registrado tanto la tensión desarrollada como la posición alcanzada respecto al tiempo requerido para alcanzar tales niveles.

Como se puede comprobar, el factor común que tienen ambos ciclos es la amplitud, a partir de la cual se realizan las diferentes comparaciones.

Cabe decir, que al mismo tiempo que se estudia la respuesta a un impulso dado, estos ensayos son, a su vez, pequeños ensayos de relajación intermitentes en el tiempo, lo cual puede aportar información extrapolando el experimento anterior a casos de menor duración.

Por otra parte y tras consultar la bibliografía, es importante remarcar que nunca antes se había realizado un ensayo de estas características sobre un material con cualidades similares.

### **2.6.3. Estudio del comportamiento a fatiga mecánica del material**

Si se estudia la naturaleza de los potenciales usos de este material, se puede observar que en casi todos se exige un uso continuado (micro-fluidos, prótesis, actuadores y micro-actuadores, ...), lo que puede ocasionar problemas de fatiga en el material. Predecir la variación de dicho comportamiento con el tiempo parece indispensable y decisivo para conocer si este material es apto para usos en los que se requiera gran cantidad de ciclos o en los que se requiera un tiempo de utilización largo y continuado.

Para estudiar la fatiga, se han realizado 2000 ciclos sinusoidales controlados en posición con una velocidad de 20mm/s y una amplitud de 40 mm de pico a pico sobre una probeta para tracción de material virgen. Las tensiones máximas alcanzadas han sido de 30 kPa para tracción y 20 kPa para compresión. La longitud inicial de mordazas ha sido de 70 milímetros.

Una vez finalizados los ciclos, se han ido realizando ensayos de tracción longitudinal a 0,11 mm/s hasta una deformación del 90,9% para observar las posibles variaciones.

Además, no solo influye en estas pruebas el posible deterioro a fatiga, sino también el tiempo de recuperación del material, el cual es grande en comparación con lo que duran los ciclos de fatiga.

Para separar los efectos anteriores, una vez más se ha modificado la prueba obteniendo dos variantes de la misma, una en la que el ensayo de tracción se realiza inmediatamente después de la finalización de los ciclos, y otra donde ese mismo test se realiza con elevados tiempos de recuperación. Dichos ensayos han sido realizados tras finalizar los ciclos número 300, 550 y 1000 sin permitir recuperarse al material y tras los ciclos 1000 y 2000 con 72 horas de recuperación transcurridas entre la finalización del ciclo y el ensayo de tracción longitudinal.

La frecuencia de muestreo ha sido de 16,67 Hz.

## **2.7. Caracterización termo-mecánica del material**

Según las hipótesis de partida del presente documento, las propiedades térmicas forman un importante bloque de propiedades que es mediador entre las propiedades eléctricas y térmicas.

A parte de eso, el estudio del comportamiento del VHB® a diferentes temperaturas por sí solo puede ayudar a comprender mejor el comportamiento del material estudiando la variación de sus curvas características.

Este apartado se ha materializado en dos experimentos presentados en los subcapítulos siguientes, por una parte, se ha conducido un ensayo a elevada temperatura (considerándose elevada en términos relativos, ya que está por encima del rango normal de operación de este material, entendiéndose este como la temperatura ambiente del laboratorio, es decir 22°C).

Por otra parte, un ensayo a bajas temperaturas completa el bloque de estudio de las propiedades térmicas, este se centra en la posibilidad de endurecimiento del material dado que, al trabajar los elastómeros por encima de su temperatura de transición vítrea, se espera que al acercarse a esta por la derecha o sobrepasarla, se produzca un severo cambio del comportamiento mecánico debido a un cambio de los mecanismos que gobiernan la elasticidad en este material.

### **2.7.1. Estudio del comportamiento del material a altas temperaturas**

Como se ha expuesto en la introducción, existen rigurosos estudios sobre la caracterización mecánica del material, en los que se ha tenido en cuenta los umbrales de temperatura de operación del VHB® y la variación de la curva tensión-deformación de la curva [22], [32], demostrando, entre otras cosas, un reblandecimiento ocasionado por el aumento de temperatura, lo que no es sorpresa al compararlo con otros elastómeros, los cuales cumplen de manera general con esta premisa.

Este efecto además se ve influenciado por el añadido de compuestos, pudiéndolo mejorar o empeorar debido a las reacciones secundarias de los monómeros residuales de dichos compuestos, afectando al envejecimiento del material [33].

En cambio, no se dispone de mucha información sobre cómo afecta la historia térmica al envejecimiento del material, entendiéndose este último como la variación abrupta de las propiedades mecánicas debidas a curaciones realizadas sobre este a temperaturas por encima de su temperatura normal de operación. Dicho estudio puede ser importante para la previsión del fallo del material en un futuro tras la aparición de fatiga térmica.

Para ello, se ha diseñado un ensayo basado en la temperatura, el cual consiste en la aplicación de un ciclo de calentamiento y mantenimiento de la temperatura por largos periodos de tiempo en una cámara climática para posteriormente, ensayar el material a tracción observando su curva.

La velocidad del ensayo ha sido de nuevo de 0,11 mm/s y la probeta ha sido llevada al 90,9% de deformación mientras la máquina registraba con una frecuencia de adquisición de datos de 16,67 Hz

Han sido testadas tres probetas con la geometría tipo 2 (la empleada para ensayos de tracción), las cuales han sido realizadas con material virgen.

La consideración de emplear tres probetas diferentes permite ensayar el material con una separación temporal entre ensayos controlada, ya que de solo emplear una, la duración del ensayo limita el control de tiempos de enfriamiento, además, así se evita registrar por error efectos de distensión debido a la recuperación del material.

Las probetas han sido ensayadas a tracción para después, llevarlas a una cámara a 42°C y se han mantenido allí durante 24 horas. Posteriormente tras la finalización del tratamiento térmico, se han ensayado de nuevo.



*Fig. 2.13: Colocación de las muestras en la cámara climática, la varilla que se aprecia es el termopar auxiliar.*

Es importante lograr un tiempo de establecimiento largo para la temperatura, debido a que la cámara se comporta como un sistema de segundo orden, lo que se traduce en grandes oscilaciones si los tiempos de calentamiento son reducidos. No obstante, se ha conseguido mantener la temperatura constante durante el tiempo que se han encontrado las probetas en la cámara.

La temperatura seleccionada para la prueba no está tomada al azar, sino que simula la temperatura alcanzable en un cuerpo humano por una violenta fiebre. Esto se ha pensado así dado que una de las aplicaciones más sonadas para las que se ofrece este tipo de materiales, es la construcción de tejido biocompatible.

Los lapsos entre ensayos han sido de 5, 15 y 25 minutos para comprobar la recuperación a corto plazo contando a partir de la salida de las probetas de la cámara climática y 72 horas para comprobar si el material se ha recuperado totalmente, la prueba de 72 horas se ha realizado sobre las tres probetas.



### **2.7.2. Estudio del comportamiento del material a bajas temperaturas**

Como ya se conoce, los elastómeros trabajan en unos rangos de temperatura superiores a su temperatura de transición vítrea  $T_g$ . Cuando estos se encuentran operando a temperaturas alejadas de esta el comportamiento que muestran cambia abruptamente.

Si la temperatura de trabajo está ubicada por encima de la temperatura de transición vítrea, se espera que el material funcione de manera elástica, con el comportamiento característico de este tipo de materiales.

En cambio, si esta temperatura de trabajo se encuentra por debajo de  $T_g$ , el material se comporta de manera opuesta, dejando de exhibir grandes deformaciones a baja carga para pasar a comportarse de manera parecida a un material cristalino, experimentando un aumento de la dureza y de la rigidez.

Esto se debe a que, a bajas temperaturas, las regiones consideradas como amorfas se encuentran en un estado de pseudo-cristal, lo que supone que las moléculas pierdan movilidad causando un aumento de la rigidez, fragilidad y dureza.

Para estudiar el efecto de dicha transición se ha enfriado hasta los  $-24^{\circ}\text{C}$  (249 K) tres probetas de VHB® durante un día completo, para posteriormente ensayarlas en la máquina de ensayos universal a una velocidad de 0,11 mm/s llevándola a una deformación máxima del 90,9% de su longitud original. El ensayo ha sido de tracción longitudinal con la geometría de la probeta designada a tal efecto como consta en el subcapítulo [2.3](#). La frecuencia de adquisición de datos ha sido de 20 Hz.

Las tres probetas han sido ensayadas separadas en el tiempo, permitiendo al material recuperarse hasta alcanzar la temperatura ambiente de nuevo ( $22^{\circ}\text{C}$ ).

La primera probeta ha sido ensayada tras pasar 5 minutos desde la finalización del tratamiento a baja temperatura, la segunda se ha dejado reposar 15 minutos entre el tratamiento y el ensayo a tracción y la tercera, 25 minutos.

En todos los casos se ha evitado manipular las muestras de manera que se generasen cargas térmicas innecesarias durante la colocación en las mordazas, además, las probetas se atemperaban durante su periodo de reposo sobre una mesa de madera, evitando el contacto con superficies conductoras del calor.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Ensayo de tracción longitudinal

Los ensayos de tracción longitudinal conducidos a 0,11 mm/s, 1mm/s y 5 mm/s sobre tres probetas diferentes, han arrojado los siguientes datos:

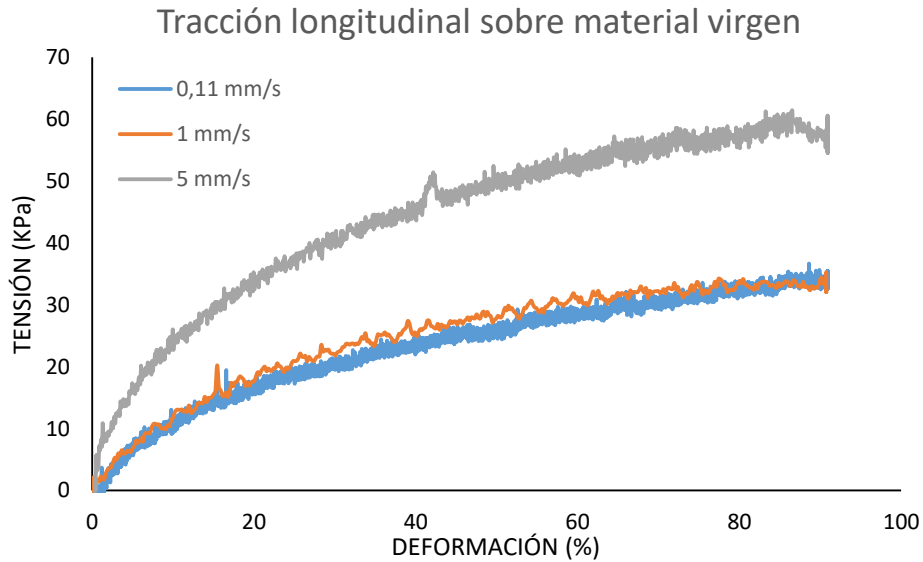


Fig. 3.1: Curva tensión deformación del comportamiento en tracción longitudinal para probetas de material VHB sin histórico previo de cargas.

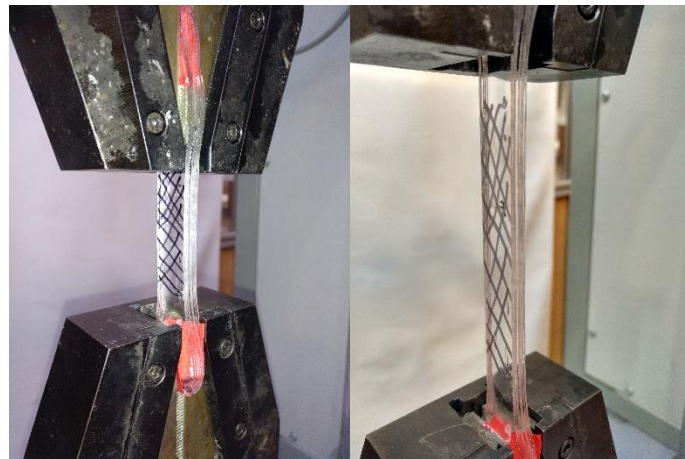


Fig. 3.2: A la izquierda probeta sin deformar, a la derecha, probeta deformada a un 90,9 %. Nótese que la reducción de área es uniforme ya que el patrón dibujado se distorsiona de manera homogénea.

### 3.2. Ensayo de tracción transversal

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante el ensayo de tracción transversal a 0,11 mm/s, los cuales se han comparado con los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción longitudinal:

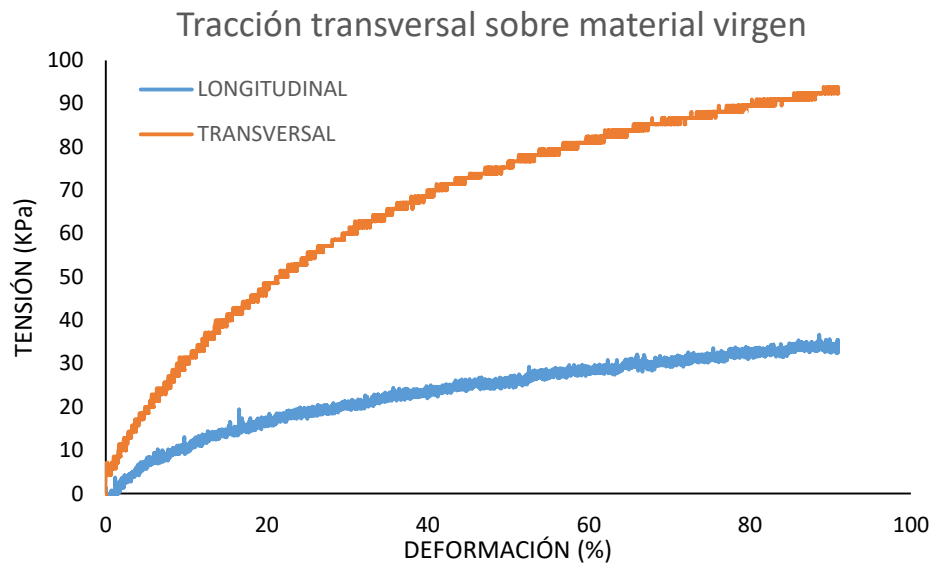


Fig. 3.3: Curva tensión deformación del comportamiento en tracción transversal sobre material virgen.

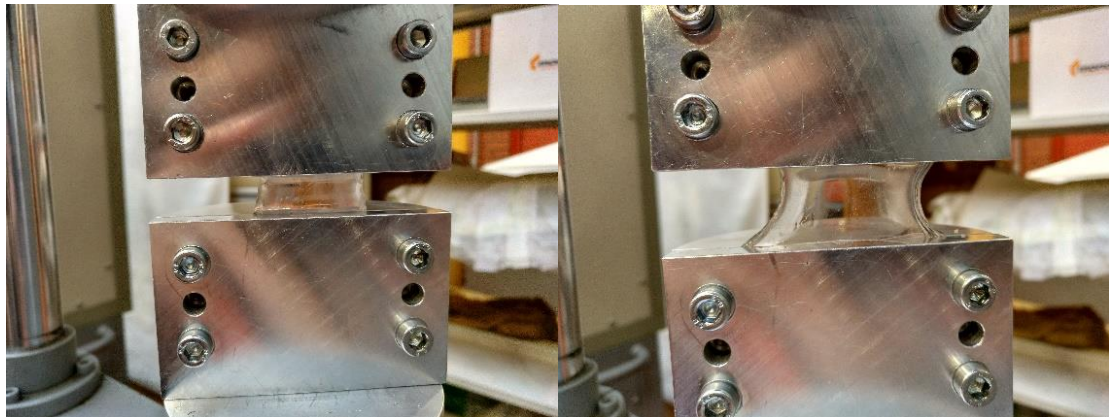
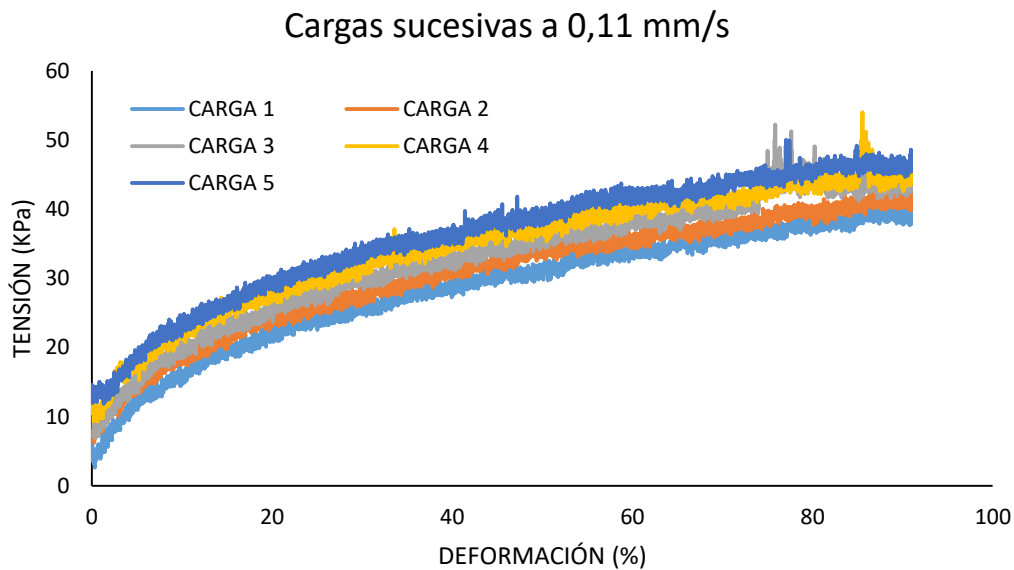


Fig. 3.4: A la izquierda probeta sin deformar en el ensayo transversal, a la derecha probeta deformada al 90,9%. Nótese la acusada estricción que presenta la muestra.

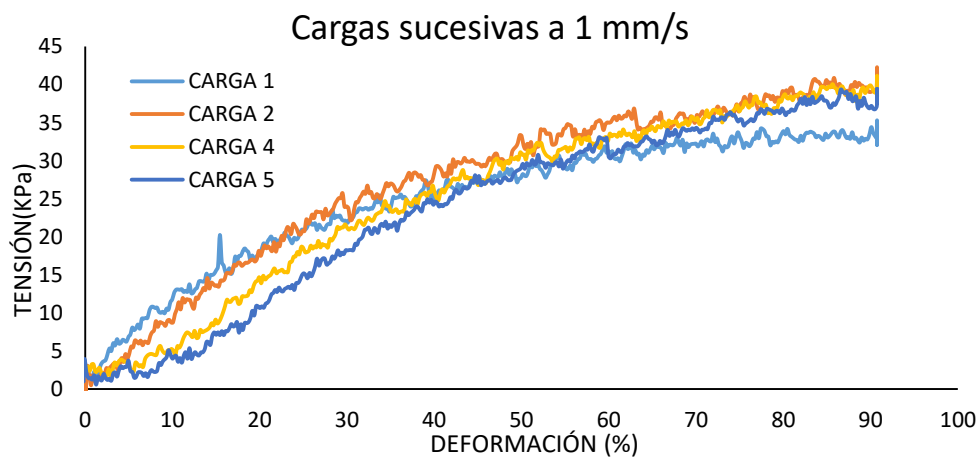
### 3.3. Ensayo de cargas sucesivas sin incremento de la fuerza

Este ensayo, conducido a tres velocidades diferentes ha arrojado los datos que se muestran en los siguientes gráficos. Para muy bajas velocidades de elongación, (0,11 mm/s) el material se comporta como sigue, sin que se vea afectado su comportamiento por la variación del tiempo de descarga, ya que no varía la curva obtenida de manera significativa a velocidades de descarga diferentes. Es decir, no existe diferencia apreciable entre una descarga a 0,11 mm/s y otra a 1 mm/s para las mismas velocidades de carga:



*Fig. 3.5: Curva tensión deformación del comportamiento en condiciones cuasiestáticas (baja velocidad).*

Donde se puede apreciar que el material se endurece con el número de ciclos, aunque la pendiente de las curvas permanece invariante, la pre-tensión de partida aumenta con el número de ciclos a bajas velocidades, lo que contrasta con los resultados obtenidos a bajas velocidades de elongación (1 mm/s):



*Fig. 3.6: Ensayo de tracción con cargas sucesivas a baja velocidad.*

En cambio, a partir de esta velocidad, parece que el material tiende a reducir la curva en vez de incrementarla, prueba de ello son los resultados de estos mismos ensayos conducidos a muy alta velocidad (5mm/s):

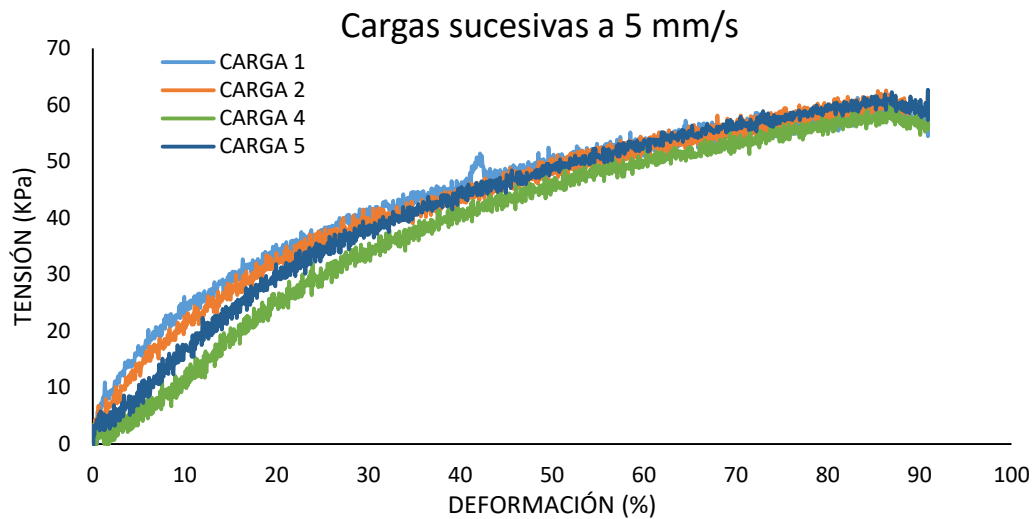


Fig. 3.7: Ensayo de tracción con cargas sucesivas a alta velocidad.

Cabe decir, que la carga tercera en los ensayos a 1mm/s y a 5mm/s se ha omitido por no ser significativa y por dificultar la comprensión de la gráfica.

### 3.4. Ensayo de cargas sucesivas con incremento de la fuerza

En la siguiente gráfica, se muestra el resultado de cinco cargas sucesivas con el incremento de la posición en escalones de 10 milímetros sobre una longitud inicial entre mordazas de 55 milímetros, los ciclos tienen un mayor recorrido a medida que se van sucediendo:

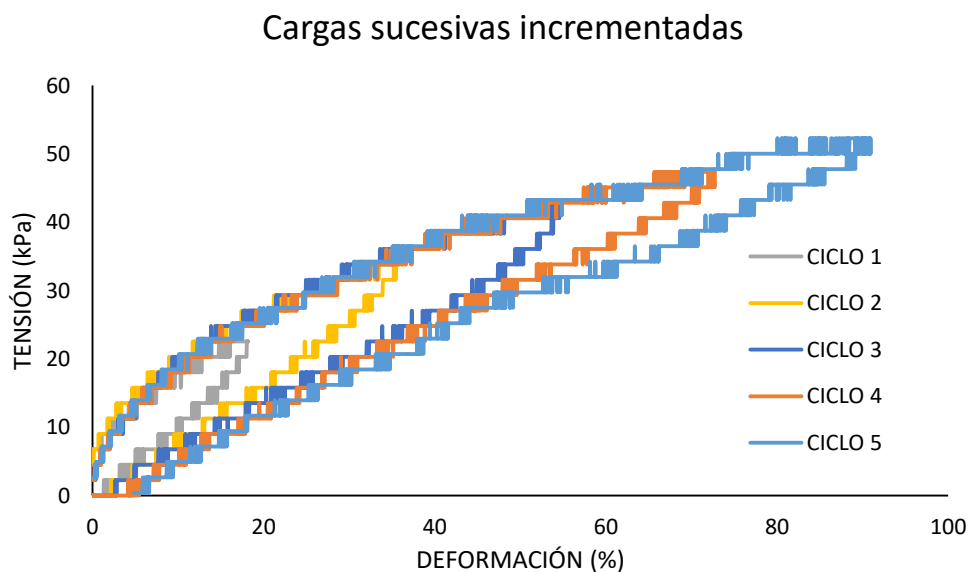
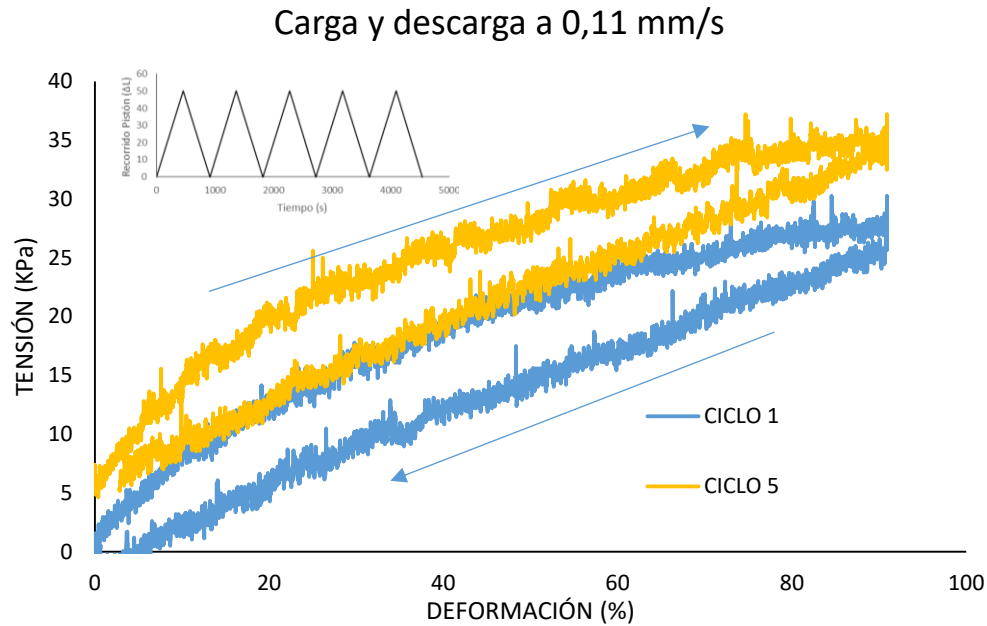


Fig. 3.8: Ensayos con cargas incrementadas a 0,11 mm/s

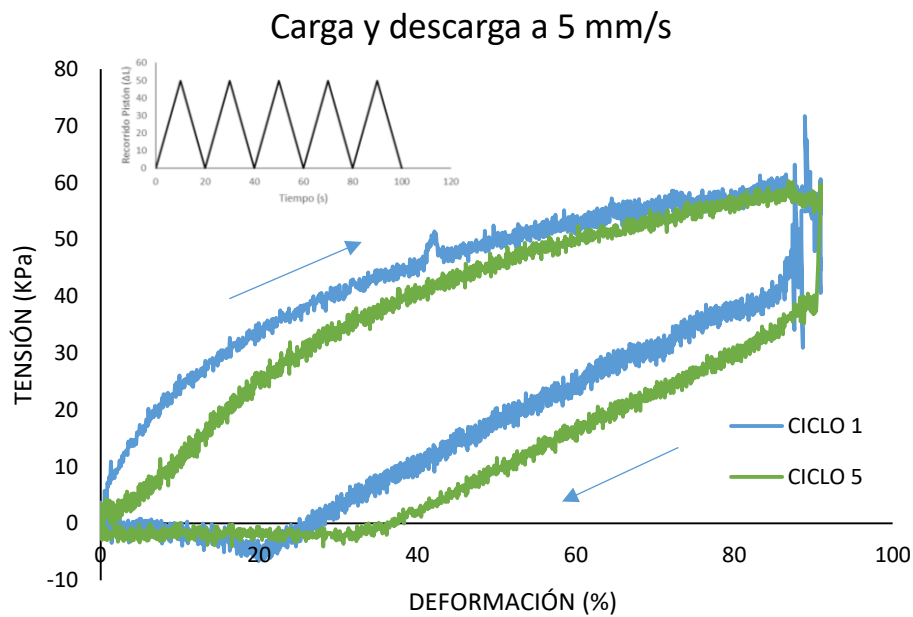
### 3.5. Ciclos de carga y descarga a tracción

En primer lugar, se muestran los ciclos primero y último del ensayo a 1 mm/s sobre material virgen:



*Fig. 3.9: Ensayo de carga y descarga a 1 mm/s.*

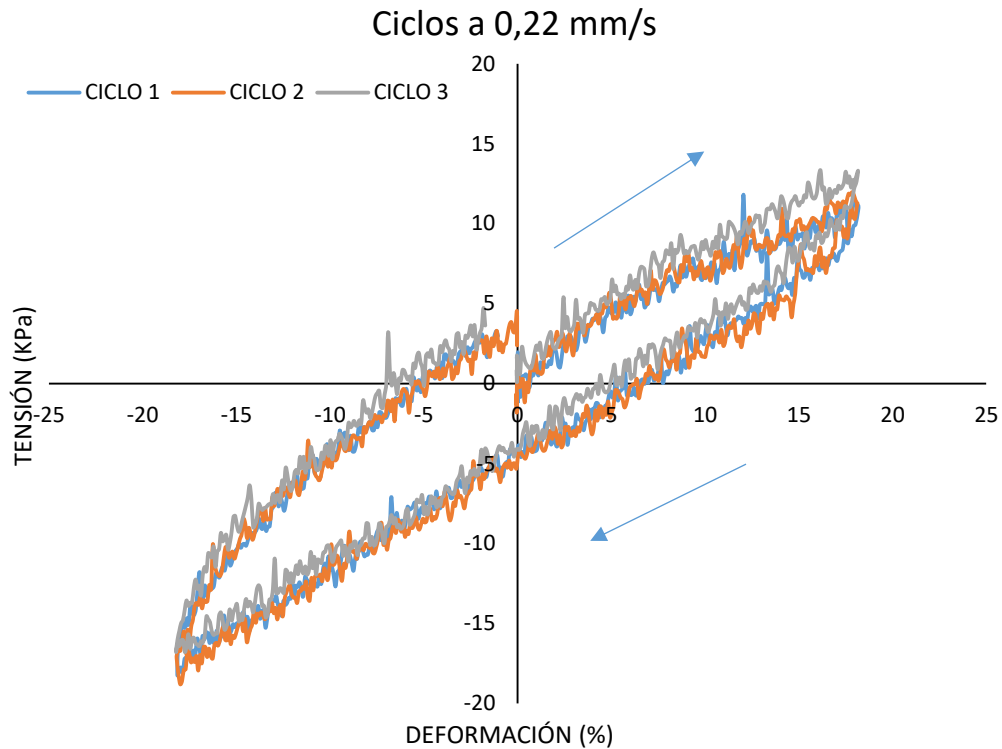
A continuación, se muestran los ciclos primero y último del ensayo a 5mm/s realizado también sobre material virgen:



*Fig. 3.10: Ensayo de carga y descarga a 5 mm/s.*

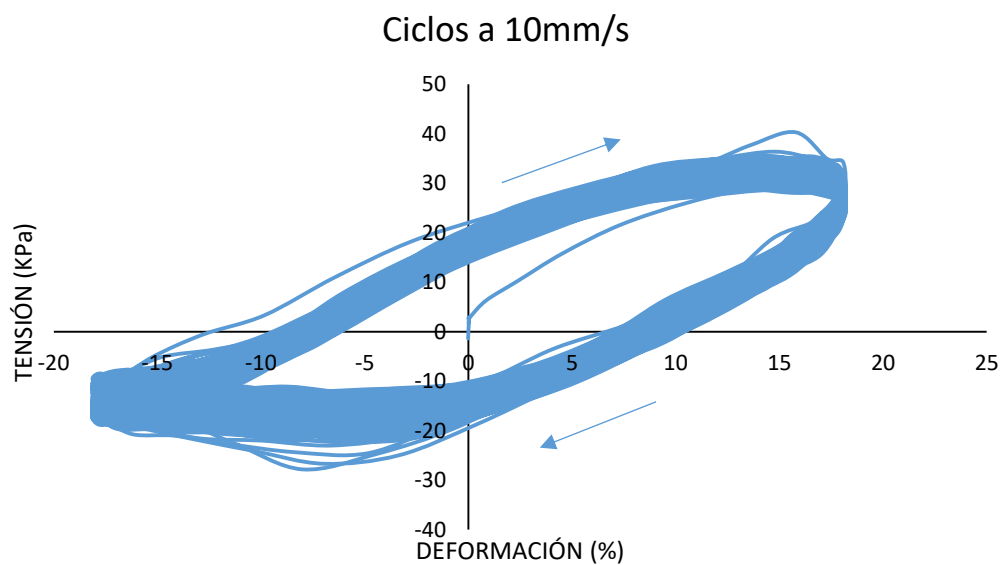
### 3.6. Ciclos de carga y descarga a tracción y compresión

En primer lugar, se muestran los resultados de los ensayos a 0,22 mm/s, donde el material virgen ha sido sometido a tres ciclos triangulares:



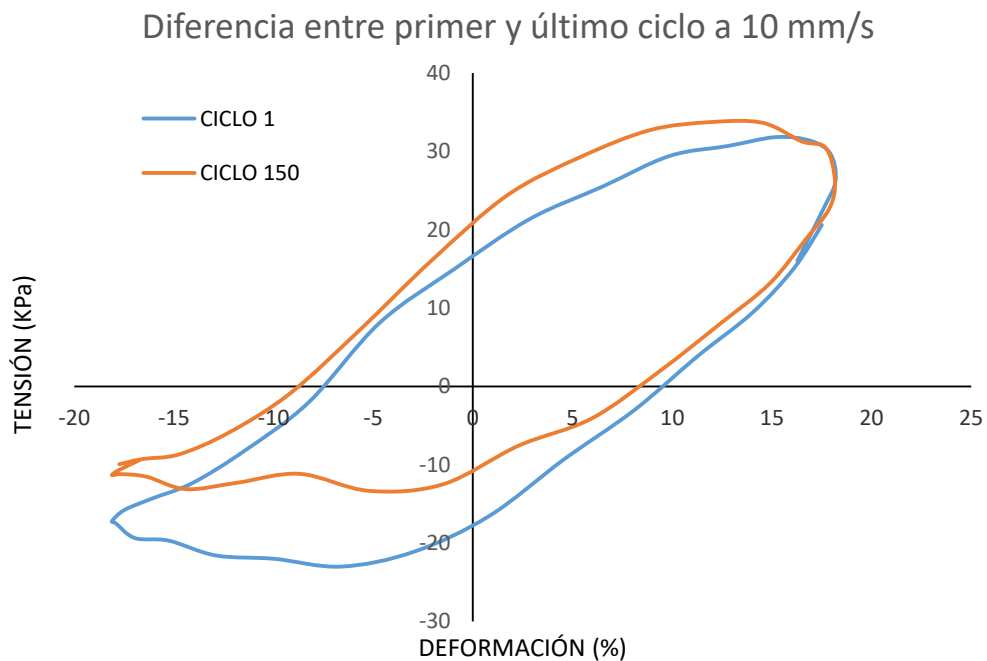
*Fig. 3.11: Resultados de los ciclos a 0,22 mm/s.*

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos a 10 mm/s, donde el material virgen ha recibido 150 ciclos sinusoidales:



*Fig. 3.12: Resultados de los ciclos a 10 mm/s.*

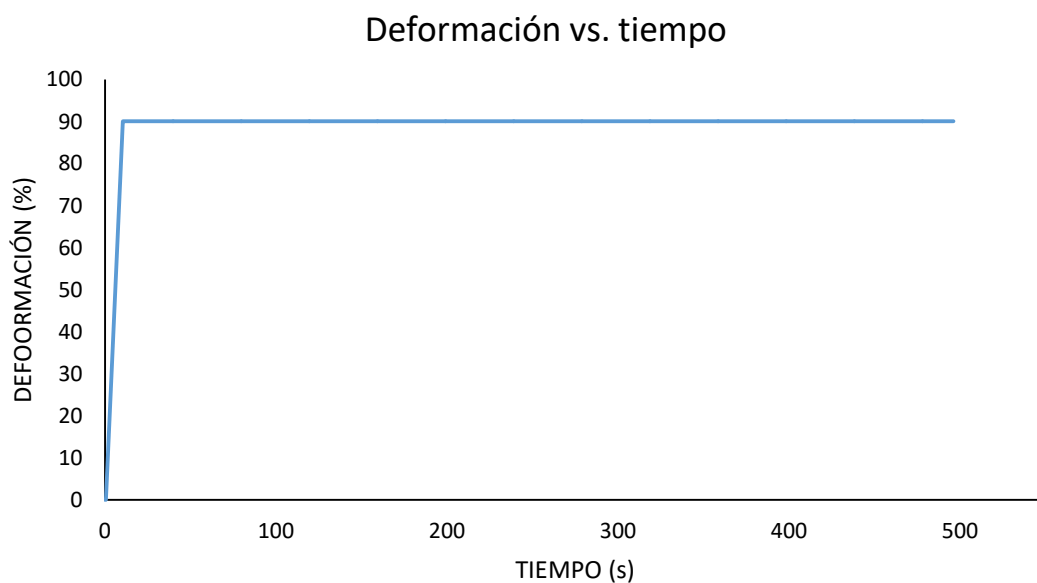
Para diferenciar el primero del último ciclo, se han separado del resto en el siguiente gráfico:



*Fig. 3.13: Diferencia de comportamiento entre ciclos sinusoidales.*

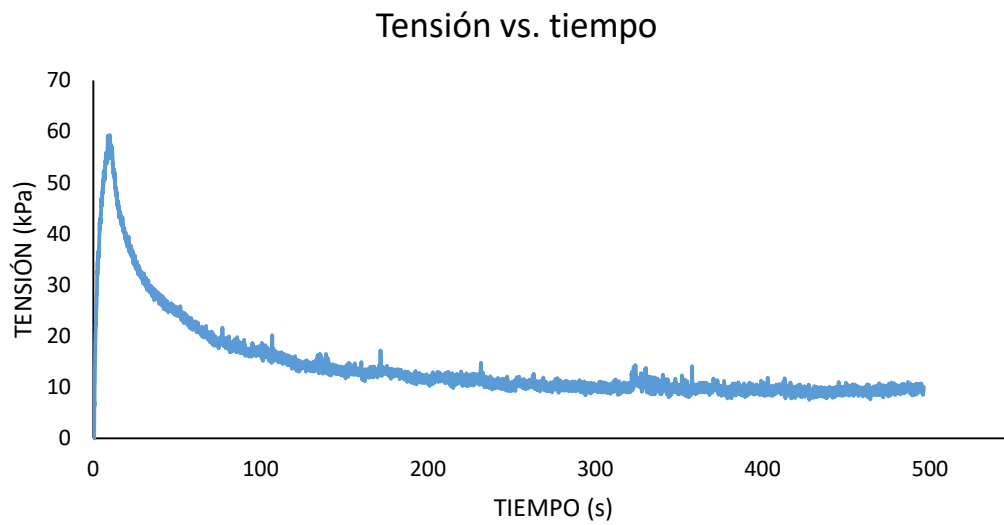
### 3.7. Ensayo de relajación

Los resultados de los ensayos de relajación de la tensión a deformación constante realizados sobre el material son los siguientes:



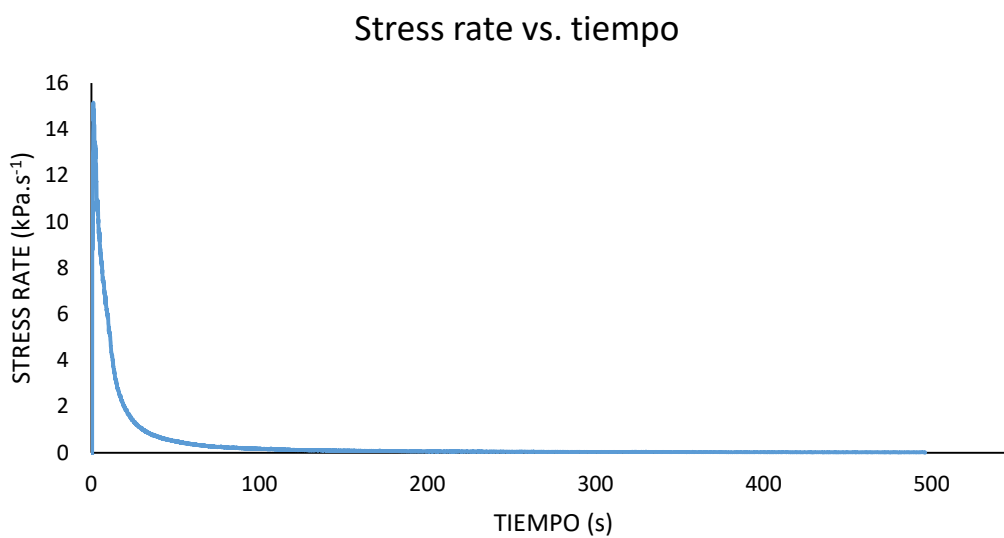
*Fig. 3.14: Deformación contra tiempo en ensayo de relajación.*





*Fig. 3.15: Tensión contra tiempo en ensayo de relajación.*

Se puede obtener la tasa de variación de la tensión dividiendo esta entre el tiempo transcurrido durante el ensayo, dicha tasa permite obtener los puntos de máxima variación de la tensión:



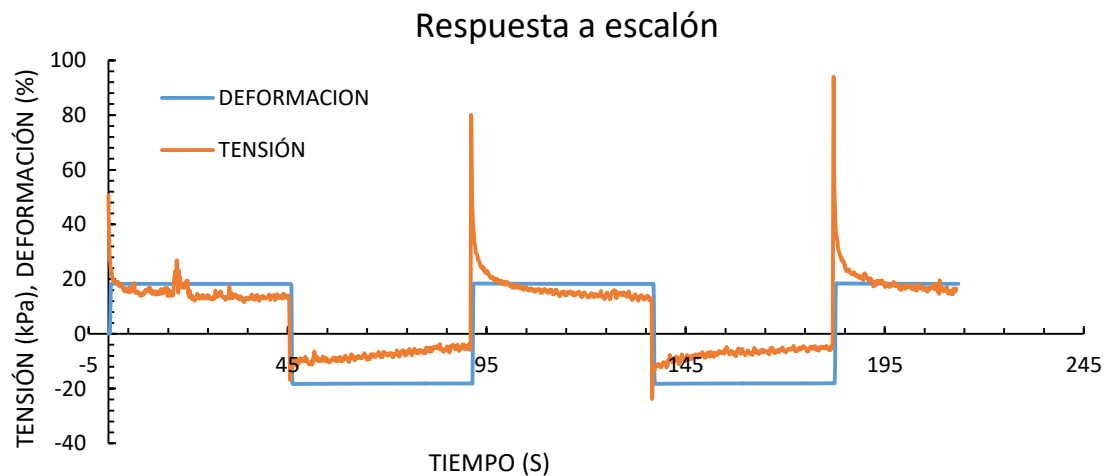
*Fig. 3.16: Stress rate contra tiempo en ensayo de relajación.*

### 3.8. Estudios de la respuesta a impulsos

En este apartado se presentan los estudios realizados sobre el desarrollo de la deformación y de la tensión en función del tiempo.

#### 3.8.1. Ensayo de la respuesta a función cuadrada

En el gráfico de abajo se muestran los resultados de la respuesta del VHB® a una variación en la posición controlada por una función cuadrada:

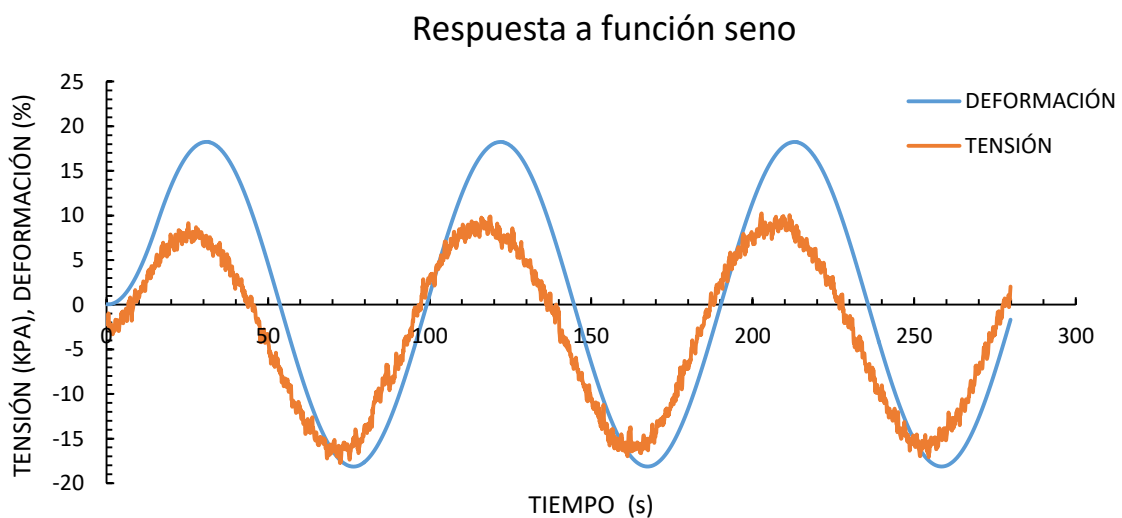


*Fig. 3.17: Respuesta del material a función escalón.*

Nótese como aparece en este caso de nuevo el fenómeno de relajación cuando la tensión decae a medida que transcurre el tiempo en los valores extremos de la deformación

#### 3.8.2. Ensayo de la respuesta a función sinusoidal

A continuación, se muestra la respuesta a un control de la posición basado en una función seno:



*Fig. 3.18: Respuesta del material a función sinusoidal.*

### 3.9. Ensayos de fatiga mecánica

El ensayo de fatiga mecánica ha sido realizado dos veces, una sin tiempo de recuperación entre la finalización del ciclo y otra con más de 72 horas de recuperación. En primer lugar, se presentan los resultados del ensayo medidos sin tiempo de recuperación:

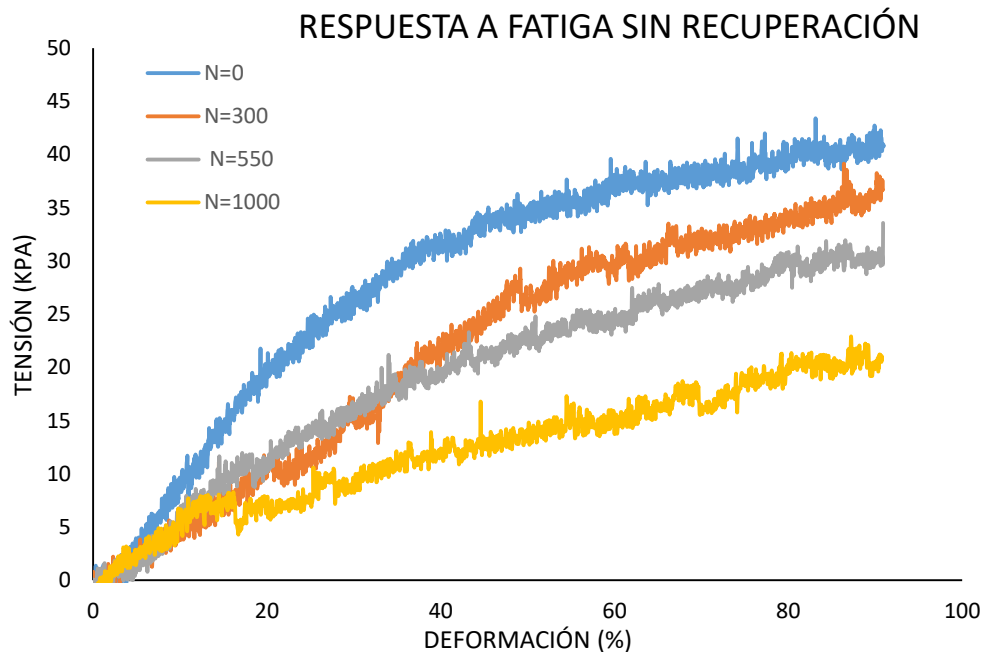


Fig. 3.19: Comportamiento del material a fatiga sin recuperación entre pruebas.

A continuación, se muestran los resultados de la prueba con tiempo de recuperación:

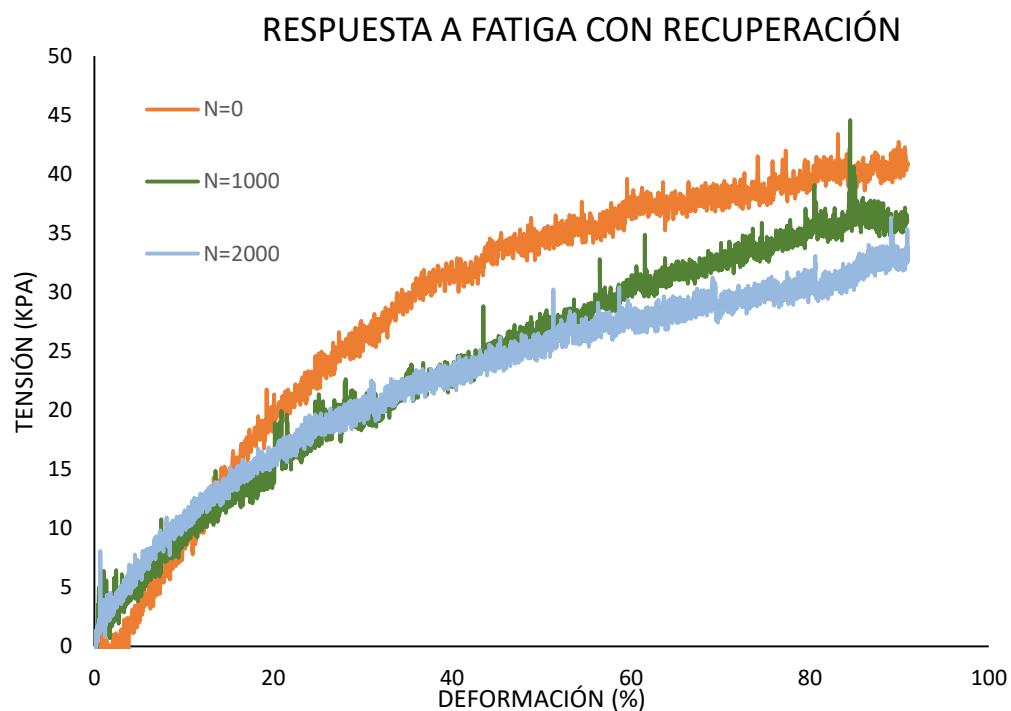
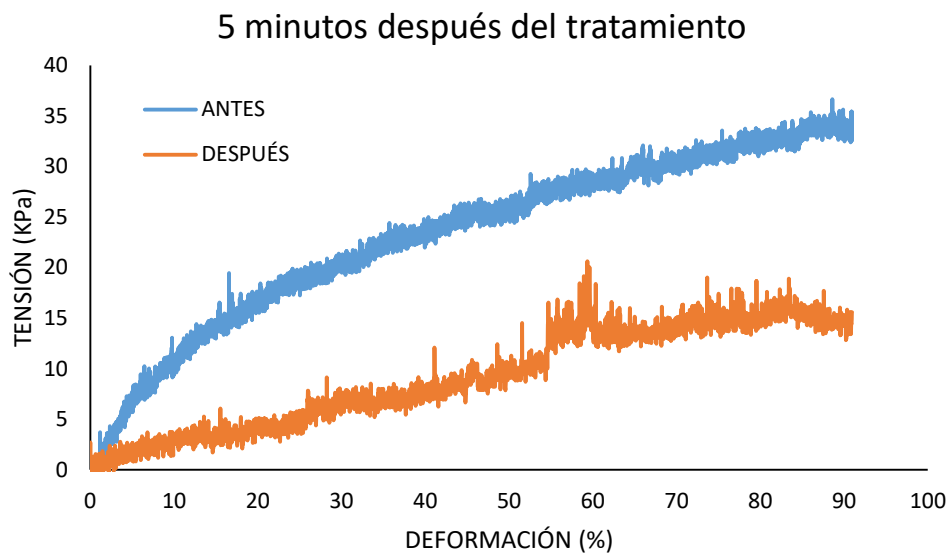


Fig. 3.20: Comportamiento del material a fatiga con recuperación entre pruebas.

### 3.10. Ensayos de comportamiento a alta temperatura

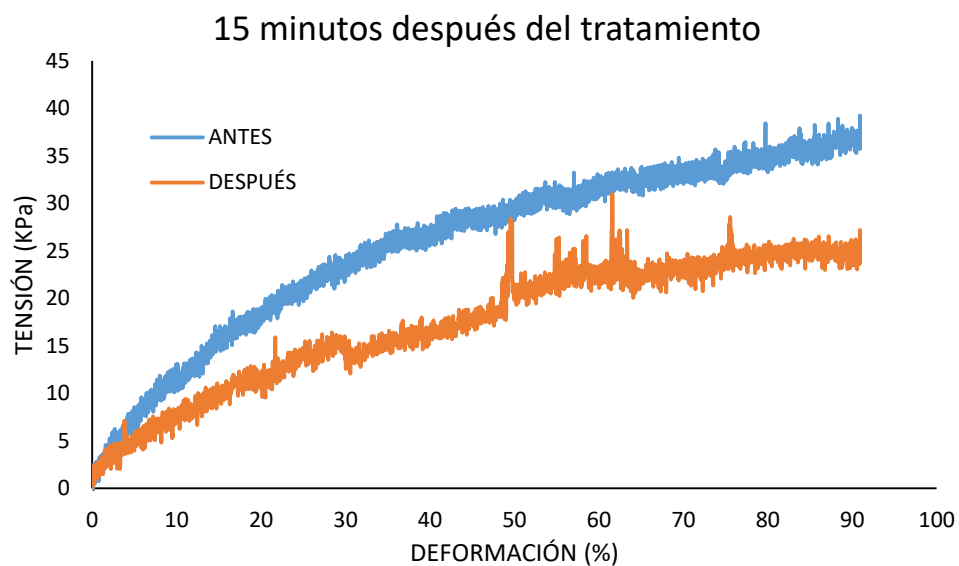
En este apartado se muestran, gráfico a gráfico, los efectos sobre las propiedades mecánicas que ejerce el mantenimiento del material a una temperatura elevada respecto a la temperatura ambiente y su recuperación con el paso del tiempo.

A los cinco minutos de que el material haya salido de la cámara climática, se ha comprobado que se comporta como sigue:



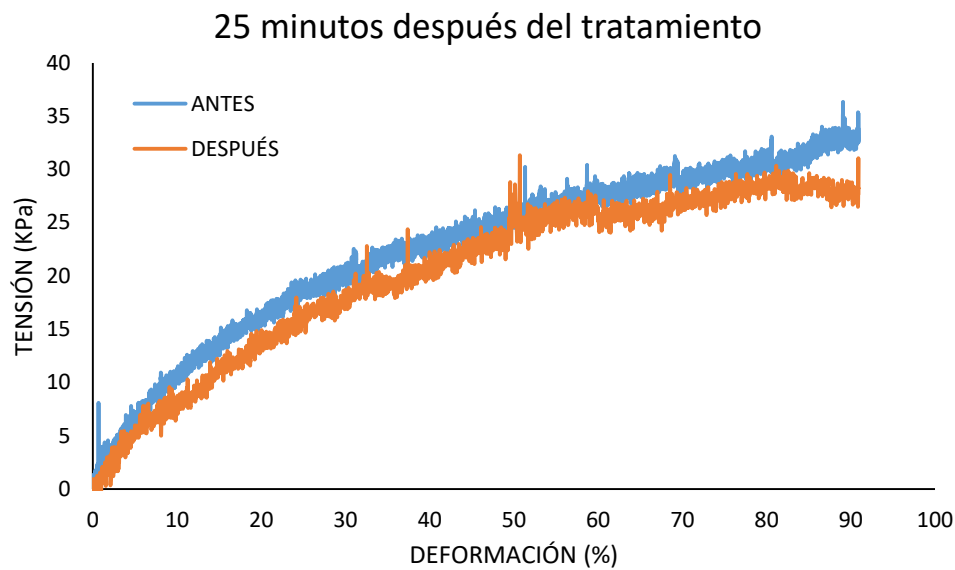
*Fig. 3.21: Recuperación de la probeta tras 5 minutos transcurridos desde el final del ensayo térmico.*

Tras 15 minutos, la curva empieza a recuperar su pendiente original:



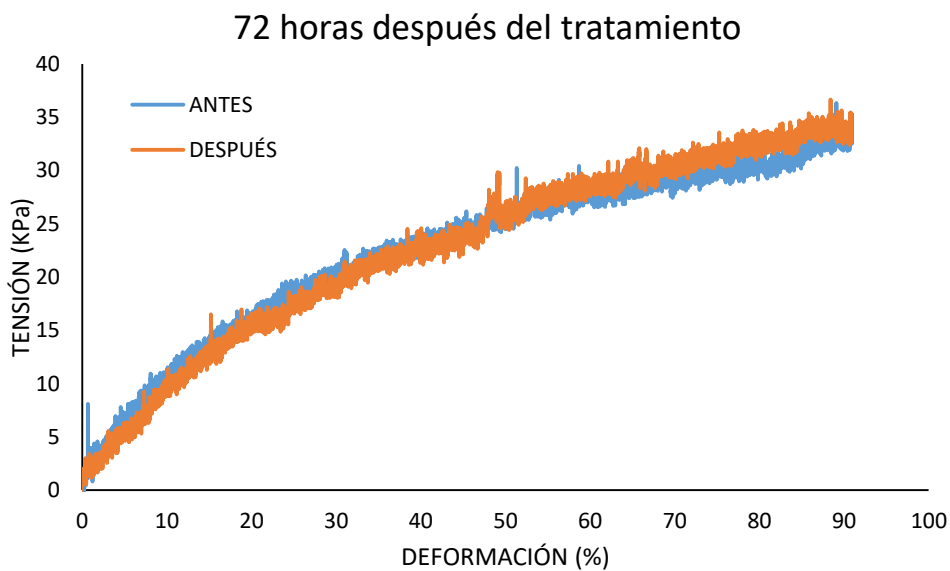
*Fig. 3.22: Recuperación de la probeta tras 15 minutos transcurridos desde el final del ensayo térmico.*

A los 25 minutos, las curvas se muestran casi idénticas:



*Fig. 3.23: Recuperación de la probeta tras 25 minutos transcurridos desde el final del ensayo térmico.*

La recuperación tras 72 horas de reposo tras el tratamiento es total, los resultados en las tres probetas tras tres días han sido idénticos en las tres probetas, se muestra a continuación el resultado:



*Fig. 3.24: Recuperación de la probeta tras 72 horas transcurridas desde el final del ensayo térmico.*

### 3.11. Ensayos de comportamiento a baja temperatura

En el siguiente gráfico se muestra la curva tensión-deformación del material tras el tratamiento a baja temperatura.

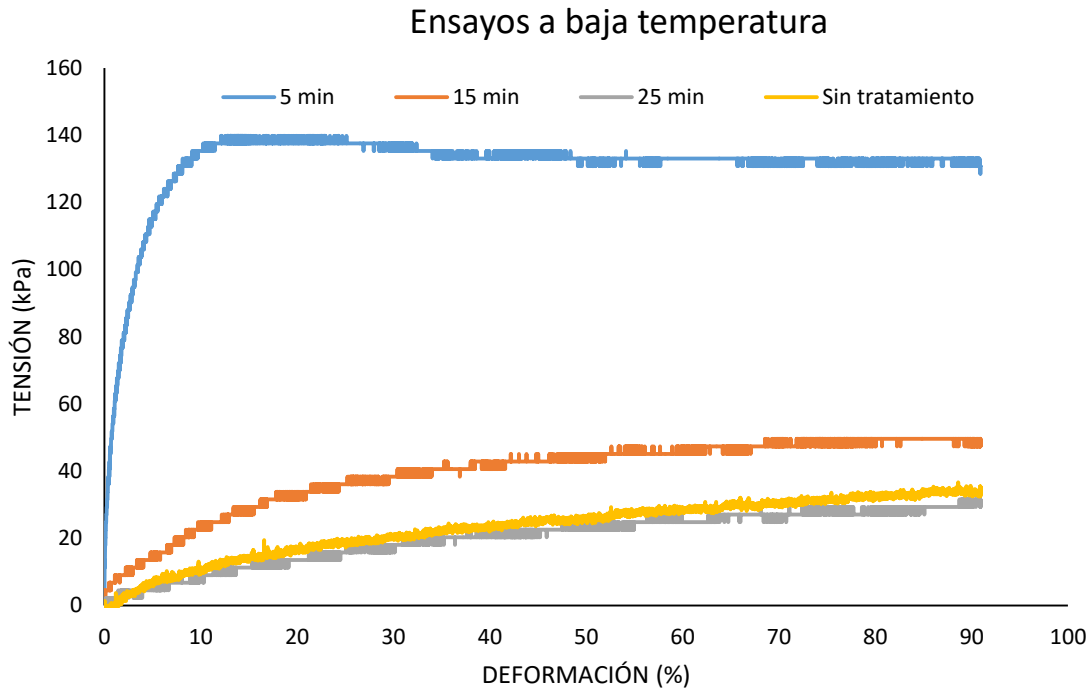


Fig. 3.25: Comparación de las curvas tensión deformación tras pasar 5, 15 y 25 minutos a temperatura ambiente tras 24 horas a  $-24^{\circ}\text{C}$ . La curva amarilla es la de una probeta virgen sin tratamiento alguno.

Cuando el material se encuentra en tiempos característicos de afectación térmica (bajas temperaturas en este caso) la curva tensión-deformación cambia drásticamente respecto a la que se da en condiciones ambientales normales (temperatura ambiente).

El material se endurece, lo cual se hace notar en la rápida escalada de la curva, la cual tiene una pendiente mucho más elevada que el resto de curvas. Al finalizar la escalada inicial, aparece un efecto parecido al que se podría considerar como una meseta de fluencia, sin embargo, ese efecto es producido por el progresivo recalentamiento del material, el cual empieza a perder parte de esa dureza y rigidez mientras aún está siendo ensayado.

Aún con los efectos del frío, no llega a producirse rotura en el material para la máxima deformación alcanzable por la máquina.

Si se compara este ensayo con el de altas temperaturas, se puede notar que el tiempo de recuperación es considerablemente menor en el caso del ensayo a bajas temperaturas, por otra parte, es cierto que la diferencia de temperatura con la temperatura ambiente para el ensayo a altas temperaturas es de  $20^{\circ}\text{C}$  mientras que para el ensayo a bajas temperaturas es de  $46^{\circ}\text{C}$  lo que favorece mucho más la transferencia de calor con el entorno.

## 4. ESTUDIO DE LOS CICLOS DE HISTÉRESIS

En el presente capítulo, se pretende emplear parte de los datos cuantitativos obtenidos en los experimentos realizados para completar la información disponible sobre el comportamiento del material.

Un aspecto importante para las aplicaciones futuras puede ser la capacidad de disipar energía que tiene este material mediante los diferentes mecanismos de histéresis, por ello, se ha obtenido la energía de deformación a partir de las curvas de carga y descarga de los experimentos correspondientes a las figuras [3.9](#) y [3.10](#) para efectuar las comparaciones apropiadas.

### 4.1. Cálculo de la energía disipada mediante histéresis en carga y descarga

Para comprobar la evolución del perfil de la energía disipada por cada ciclo, se han tenido en cuenta en esta ocasión los ciclos de carga y descarga realizados a tracción simple a 0,11 y 5 mm/s, los ciclos empleados han sido los del 2 al 5 para las dos velocidades, el primer se ha omitido para evitar introducir posibles variaciones no relacionadas con la histéresis en sí, como el efecto Mullins o un posible endurecimiento causado por la tracción del material virgen. En primer lugar, se han obtenido los ajustes polinómicos apropiados para las dos velocidades. Estos ajustes fenomenológicos servirán para obtener a partir de ellos el área bajo la curva que dibujan, la cual coincide con el trabajo realizado sobre el material en cuestión.

Dicho trabajo es a su vez la energía de deformación almacenada por el material para esta configuración de tracción simple, además si las magnitudes de la curva pasan a ser intensivas, (presión en lugar de fuerza y deformación en lugar de desplazamiento), se puede definir la densidad de energía de deformación como:

$$u = \int \sigma d\varepsilon \quad (4.1)$$

Donde serán necesarios tomar límites de integración correspondientes con los valores máximos y mínimos de deformación:

$$u_i = \int_{\varepsilon_{min}}^{\varepsilon_{max}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \int_0^{90,9} \sigma_i(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4.2)$$

A continuación, se exponen las líneas de tendencia que ajustan las respectivas cargas y descargas de los ciclos realizados a 0,11 mm/s.

### Aproximaciones de los ciclos a 0,11 mm/s

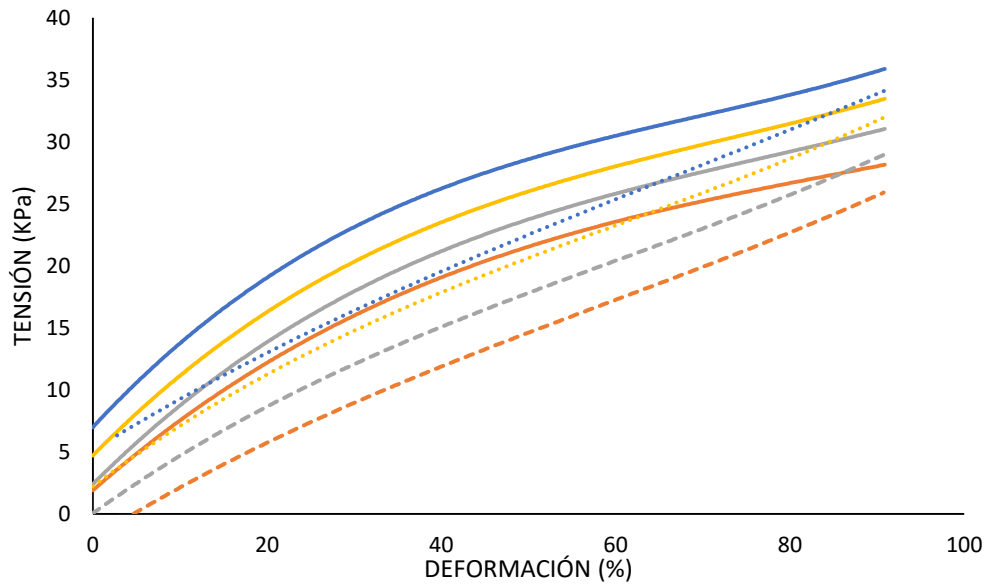


Fig. 4.1: Ajuste de polinomios a las curvas tensión-deformación de los ciclos a 0,11 mm/s.

Los ciclos 2, 3, 4 y 5 son las líneas: naranja, gris, amarilla y azul respectivamente (se ha omitido la leyenda por las dimensiones ocupadas sobre el gráfico), el trazado continuo describe la carga y el discontinuo la descarga del ciclo.

Realizando un ajuste análogo sobre los ciclos a 5 mm/s, se obtienen las siguientes curvas polinómicas:

### Aproximaciones de los ciclos a 5 mm/s

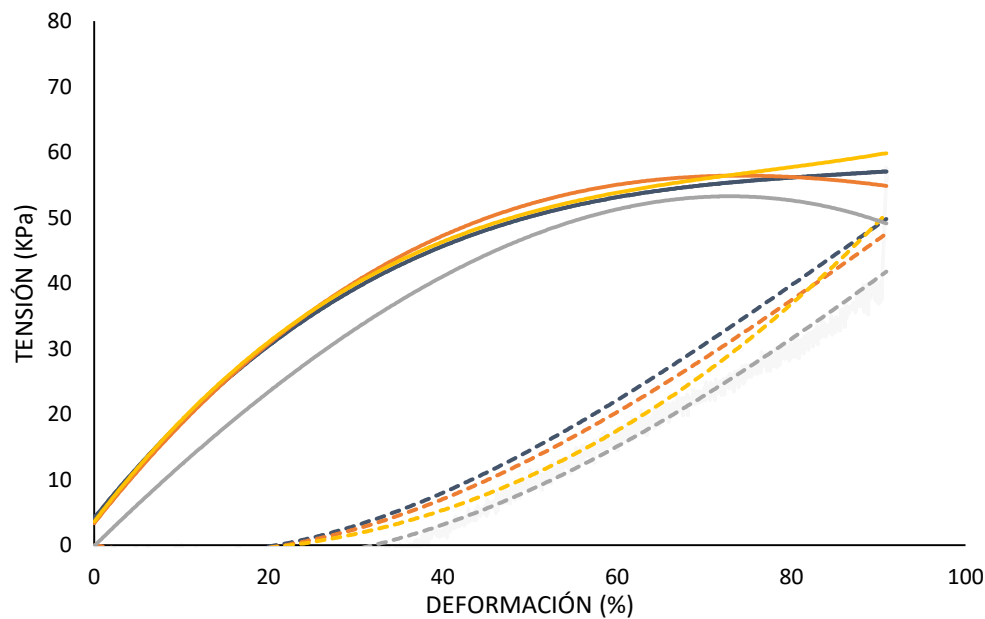


Fig. 4.2: Ajuste de polinomios a las curvas tensión-deformación de los ciclos a 5mm/s.



Donde los ciclos 2, 3, 4, y 5 son las líneas: azul, naranja, amarilla y gris respectivamente. De nuevo se ha omitido la leyenda por las mismas razones, el trazado continuo vuelve a describir la carga y el discontinuo la descarga de los ciclos.

Los polinomios a los que se han ajustado las curvas son los siguientes, con la tensión en kilopascales y la deformación en tanto por ciento:

CICLOS A 0,11 mm/s		
CURVAS	POLINOMIOS	R <sup>2</sup>
Carga 2	$\sigma = 2E-05\epsilon^3 - 0,0055 \epsilon^2 + 0,6169 \epsilon + 1,8995$	0,9929
Descarga 2	$\sigma = 2E-05 \epsilon^3 - 0,003 \epsilon^2 + 0,4387 \epsilon - 1,9728$	0,9931
Carga 3	$\sigma = 3E-05 \epsilon^3 - 0,0069 \epsilon^2 + 0,6995 \epsilon + 2,4066$	0,9929
Descarga 3	$\sigma = 2E-05 \epsilon^3 - 0,0041 \epsilon^2 + 0,5024 \epsilon + 0,0518$	0,9933
Carga 4	$\sigma = 3E-05 \epsilon^3 - 0,0075 \epsilon^2 + 0,7144 \epsilon + 4,711$	0,9937
Descarga 4	$\sigma = 2E-05 \epsilon^3 - 0,0045 \epsilon^2 + 0,531 \epsilon + 2,2213$	0,9929
Carga 5	$\sigma = 4E-05 \epsilon^3 - 0,0086 \epsilon^2 + 0,7579 \epsilon + 6,9876$	0,9883
Descarga 5	$\sigma = 1E-05 \epsilon^3 - 0,0023 \epsilon^2 + 0,4334 \epsilon + 5,1435$	0,9931

Tabla 4.1: Polinomios para las curvas a 0,11 mm/s.

CICLOS A 5 mm/s		
CURVAS	POLINOMIOS	R <sup>2</sup>
Carga 2	$\sigma = 7E-05 \epsilon^3 - 0,0179 \epsilon^2 + 1,6446 \epsilon + 4,1584$	0,9675
Descarga 2	$\sigma = -5E-05 \epsilon^3 + 0,0137 \epsilon^2 - 0,2626 \epsilon$	0,9608
Carga 3	$\sigma = 4E-05 \epsilon^3 - 0,0163 \epsilon^2 + 1,6767 \epsilon + 3,3529$	0,9490
Descarga 3	$\sigma = -4E-05 \epsilon^3 + 0,0124 \epsilon^2 - 0,254 \epsilon + 0,0712$	0,9659
Carga 4	$\sigma = 9E-05 \epsilon^3 - 0,0204 \epsilon^2 + 1,7431 \epsilon + 3,5946$	0,9905
Descarga 4	$\sigma = 2E-05 \epsilon^3 + 0,006 \epsilon^2 - 0,117 \epsilon - 0,5865$	0,9575
Carga 5	$\sigma = -3E-05 \epsilon^3 - 0,0055 \epsilon^2 + 1,2969 \epsilon - 0,1056$	0,9383
Descarga 5	$\sigma = -4E-05 \epsilon^3 + 0,012 \epsilon^2 - 0,337 \epsilon - 0,3808$	0,9723

Tabla 4.2: Polinomios para las curvas a 5 mm/s.

Como se puede observar, los valores de R cuadrado para los ciclos a 0,11 mm/s están en torno al 0,99 dando una buena estimación del alto grado de similitud del ajuste con los datos reales. Por otro lado, los valores para los ciclos de 5 mm/s tienen un valor más bajo de correlación, debido sin duda a los valores limítrofes en torno a la deformación máxima, ya que es donde existe un mayor nivel de ruido entregado por la máquina de ensayos.

Si se integran los polinomios según la expresión 4.2, se puede obtener la variación de la función densidad de energía de deformación para cada ciclo a partir de los datos obtenidos del ensayo de tracción de la siguiente forma:

$$\Delta u_i = \int_0^{90,9} \sigma_{ci}(\epsilon) d\epsilon - \int_0^{90,9} \sigma_{di}(\epsilon) d\epsilon \quad (4.3)$$

Donde  $\sigma_{ci}(\varepsilon)$  es el polinomio ajustado a la carga y  $\sigma_{di}(\varepsilon)$  es el correspondiente a la descarga, por lo que evaluando la diferencia entre ambas áreas se obtendrá la energía disipada por histéresis para los ciclos  $i$ -ésimos (2 a 5).

En las siguientes tablas se muestran los cálculos de la densidad de energía a partir de las expresiones 4.2 para la energía por curva y 4.3 para la energía disipada:

<b>Energías a velocidad: 0,11 mm/s</b>					
CICLO	$u_{carga}$ kJ/m <sup>3</sup>	$u_{descarga}$ kJ/m <sup>3</sup>	$\Delta u_{c-d}$ kJ/m <sup>3</sup>	Variación Porcentual	Variación entre ciclos
2	16,86	12,23	4,63	27,42%	0,00%
3	18,93	13,95	4,98	26,31%	1,12%
4	20,14	16,10	4,04	20,04%	6,27%
5	22,96	18,52	4,43	19,30%	0,74%

*Tabla 4.3: Valores de la densidad de energía de deformación para los ciclos a 0,11 mm/s.*

Nótese, que al realizar la integración sobre el polinomio de ajuste pertinente, al estar la deformación en porcentaje, el resultado entregado está escalado cien veces respecto del real, por lo que para obtener dicho resultado, se han dividido los resultados entre la centena.

Tras los cálculos de los valores de  $u$  para las cargas y las descargas, se ha calculado la variación porcentual de energía como:

$$VE_i = \frac{u_{ci} - u_{di}}{u_{ci}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

El promedio de la disipación de la función densidad de energía se encuentra en 23,27% con una desviación típica de  $\pm 4,19$  puntos.

La variación porcentual entre ciclos de la energía disipada es la diferencia entre un ciclo y su sucesivo en valor absoluto, da una idea de la progresión para advertir la posible existencia de una tendencia.

Para calcular las variaciones de energía en el caso de los ciclos a 5 mm/s, ha sido necesario cambiar los límites de integración para las curvas de descarga, ya que, por falta de sensibilidad de la máquina, estas tienden en casi todos los ciclos a cortar el eje de deformación muy a la derecha de cero, lo que al aproximar las curvas con polinomios ocasionan que estos se ajusten con un área bajo el eje de deformación inexistente en el ensayo real.

Para ello, en primer lugar, se han hallado las raíces de los polinomios cúbicos asociados a las descargas con ayuda de la figura 4.2:

CICLOS A 5 mm/s		
CURVAS	POLINOMIOS	RAÍZ
Descarga 2	$\sigma = -5\text{E-}05 \epsilon^3 + 0,0137 \epsilon^2 - 0,2626 \epsilon$	20,7373
Descarga 3	$\sigma = -4\text{E-}05 \epsilon^3 + 0,0124 \epsilon^2 - 0,254 \epsilon + 0,0712$	21,7451
Descarga 4	$\sigma = 2\text{E-}05 \epsilon^3 + 0,006 \epsilon^2 - 0,117 \epsilon - 0,5865$	22,2448
Descarga 5	$\sigma = -4\text{E-}05 \epsilon^3 + 0,012 \epsilon^2 - 0,337 \epsilon - 0,3808$	32,5991

Tabla 4.4: Cortes con el eje X de los polinomios.

Luego las energías de descarga para los ciclos a 5 mm/s se calcularán como:

$$u_{d2} = \int_{20,7373}^{90,9} \sigma_{d2}(\epsilon) d\epsilon \quad (4.5)$$

$$u_{d3} = \int_{21,7451}^{90,9} \sigma_{d3}(\epsilon) d\epsilon \quad (4.6)$$

$$u_{d4} = \int_{22,2448}^{90,9} \sigma_{d4}(\epsilon) d\epsilon \quad (4.7)$$

$$u_{d5} = \int_{32,5991}^{90,9} \sigma_{d5}(\epsilon) d\epsilon \quad (4.8)$$

Teniendo en cuenta la modificación sobre el problema, se vuelve a aplicar el mismo procedimiento para obtener la disipación de energía de los ciclos a 5 mm/s:

Energías a velocidad: 5 mm/s					
CICLO	$u_{carga}$ KJ/m <sup>3</sup>	$u_{descarga}$ KJ/m <sup>3</sup>	$\Delta u_{c-d}$ KJ/m <sup>3</sup>	Variación Porcentual	Variación entre ciclos
2	38,86	15,09	23,77	61,15%	2,41%
3	38,34	13,97	24,37	63,56%	2,94%
4	39,57	13,25	26,32	66,50%	5,78%
5	34,59	9,59	25,00	72,28%	0,00%

Tabla 4.5: Valores de la densidad de energía de deformación para los ciclos a 5mm/s.

En este caso, el promedio de la disipación de la función densidad de energía se encuentra en 65,87% con una desviación típica de  $\pm 4,80$  puntos.

A continuación, se muestran gráficamente los datos calculados:

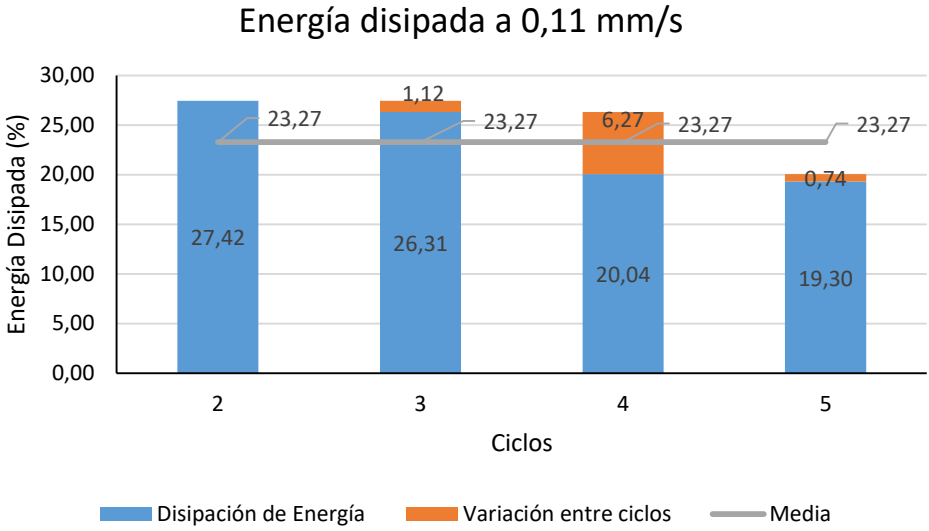


Fig. 4.3: Diagrama de la energía disipada a 0,11 mm/s.

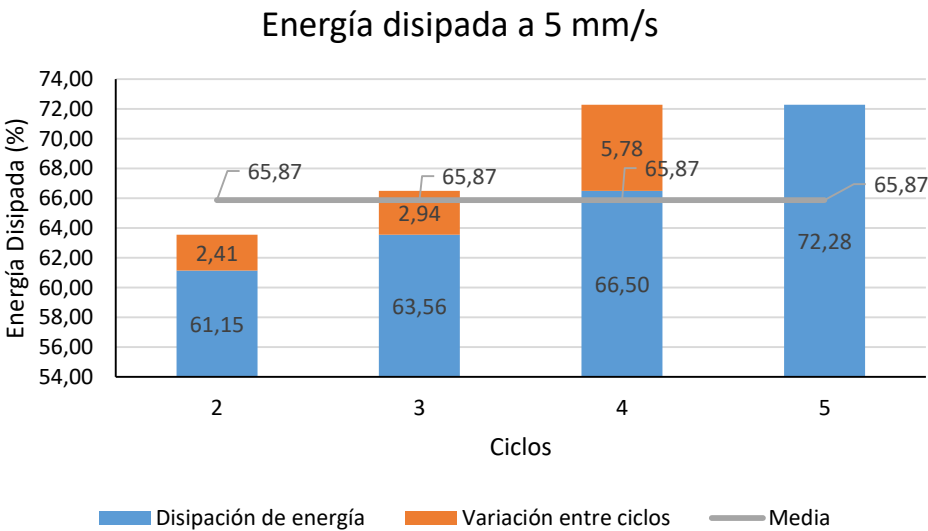
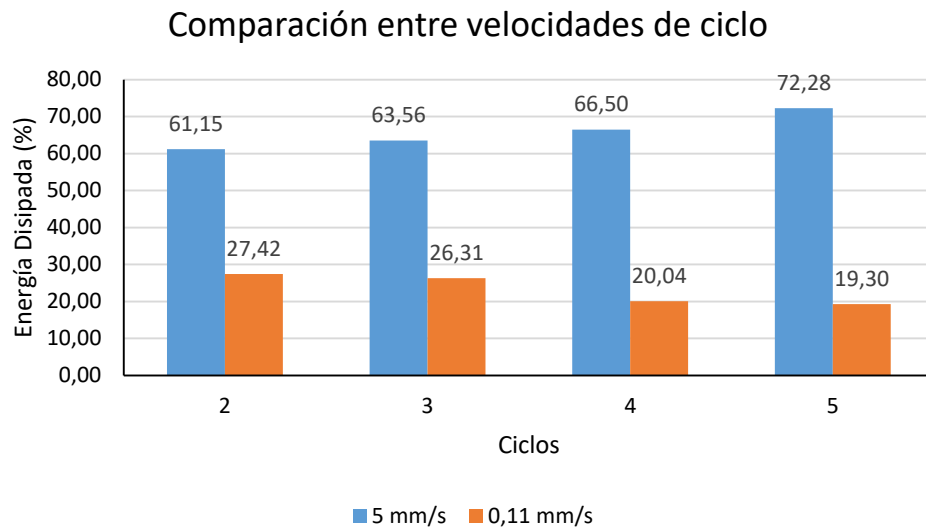


Fig. 4.4: Diagrama de la energía disipada a 5 mm/s.

Si se comparan las energías disipadas mediante un tercer diagrama, se pueden establecer relaciones teniendo en cuenta las velocidades de deformación:



*Fig. 4.5: Diferencia de la energía disipada por cada ciclo y velocidad.*

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Concluidas las explicaciones de los métodos y la representación de resultados, se pasa a exponer en el presente capítulo los análisis realizados por medio de la interpretación de las gráficas de los resultados, de su análisis en el capítulo cuarto y de las experiencias acontecidas durante la realización del trabajo.

### 5.1. De las pruebas de tracción: endurecimiento y anisotropía

Si se observan las curvas obtenidas tras los ensayos de tracción longitudinal en la figura [3.1](#), lo primero que destaca sobre todo es la dependencia del comportamiento del material con la velocidad de deformación.

Por una parte, se puede observar cómo la dureza del VHB® aumenta con la velocidad de deformación con una progresión no lineal, ya que una deformación a 1 mm/s supone realizar el ensayo a una velocidad de casi un orden de magnitud por encima de la velocidad designada para el ensayo a muy baja velocidad (0,11 mm/s), no obstante, la variación de la curva de un ensayo respecto del otro es casi nula. Asimismo, cuando la velocidad del ensayo se incrementa casi 46 veces respecto de la del ensayo a baja velocidad, la curva dispara su pendiente muy por encima de las cotas encontradas en el primer ensayo.

Esto claramente supone una falta de proporción lineal entre la pendiente de la curva tensión-deformación y la velocidad del ensayo.

Esto es un comportamiento característico de los elastómeros, grupo de polímeros al cual se adscribe el VHB®.

Por otra parte, es fácil advertir que la curva obtenida experimentalmente dista mucho de las curvas teóricas dadas para los materiales hiperelásticos ideales (curvas como la que aparece en la figura [2.7](#)). Esto se debe principalmente a que la tensión representada en las gráficas es la ingenieril, en este tipo de materiales, al alcanzar altos niveles de deformación, el área se reduce tanto que la tensión real alcanzada es más alta para el tercer tramo de la curva que la tensión ingenieril.

Además, no se ha podido llevar el material a mayores deformaciones, por lo que la parte más alejada de la curva respecto del origen pierde visibilidad, apreciándose la característica meseta central de los elastómeros, donde a un pequeño incremento de la tensión una vez iniciada la deformación se obtienen grandes deformaciones.

No obstante, se pueden extraer conclusiones cuantitativas sobre las curvas experimentales aún sin llegar a recoger todo el rango de comportamiento del material: a partir de las curvas experimentales se puede obtener las tensiones necesarias para deformar el material al 90,9% de su longitud inicial a 22°C. Dichas tensiones serían de 56 kPa, para una velocidad de deformación de 5 mm/s y en torno a 33 kPa para unas velocidades de 1 y 0,11 mm/s.

Si se observa la fotografía [3.2](#), se puede observar como un patrón dibujado sobre la probeta antes de alcanzar la estricción se deforma uniformemente con ella sin distorsionarse, lo que da pie a enumerar otro de los comportamientos típicos de los elastómeros: la falta de reducción de área por estricción localizada.

La reducción del área transversal se nota de manera muy acusada en toda su longitud (especialmente en la figura [3.4](#)), lo cual tiene consistencia cuando se tiene en cuenta el coeficiente de Poisson declarado por su fabricante ( $\nu = 0.49$ ).

Si se pasa ahora a la gráfica de la figura [3.3](#), se puede observar la diferencia de comportamientos entre las dos orientaciones principales (longitudinal y transversal) de la probeta para una deformación de velocidad 0,11 mm/s.

Este ensayo ha sido realizado dos veces con dos diferentes probetas (diferenciadas en área, longitud inicial, rollo de material de origen y pre-estricción inicial) debido a las sospechas que ha levantado la clara diferencia de comportamiento.

Cuando el material se tensiona transversalmente, se obtiene una curva con una forma bastante parecida a la que se obtiene en el ensayo longitudinal, pero con la salvedad de que esta alcanza unas cotas mucho mayores (para una deformación del 90,9% se obtienen valores de tensión de 32 kPa para la dirección longitudinal y de 92 kPa para la transversal).

Este fenómeno en un principio parece indicar una clara anisotropía entre dos de las direcciones de orientación del material, aunque también puede ser muy posible que el apilado de láminas para la creación de probetas esté interfiriendo en la prueba de forma sinérgica elevando los valores del ensayo.

Por desgracia, no ha sido posible probar la influencia de la orientación en una sola lámina debido a la ya mencionada falta de sensibilidad de la máquina de ensayos universal disponible.

Aunque son necesarios más estudios sobre láminas simples para completar resultados, la posibilidad de darse anisotropía en un elastómero es sumamente factible si hay predominancia de las regiones cristalinas sobre las regiones amorfas en el material.

Otra posibilidad puede ser el hecho de que este efecto se vea acrecentado por efectos remanentes del proceso de fabricación de la cinta de VHB® el cual permanece desconocido para la literatura actual.

Ya sea porque realmente el VHB® sea un material anisotrópico o por efectos del apilado y/o de la fabricación de la cinta, este evento aporta al estado del arte de manera positiva, pues se pueden abrir nuevas líneas de investigación en lo que respecta a la fabricación de materiales compuestos con este material o se puede incorporar esta información para la realización de futuros modelos descriptivos del material.

Por último y no menos importante, resta comentar sobre las diferentes aportaciones de la experiencia durante la realización de estos ensayos, durante los cuales se dieron dificultades mayores para evitar el deslizamiento del material de las mordazas a medida que avanzaba el ensayo, ya que como se ha comentado anteriormente, el material no presenta una deformación localizada, sino que se experimenta en todo su volumen, lo

que ocasiona que el *creep* desplace la muestra de las mordazas ocasionando problemas en la recogida de datos.

Para reducir dicho efecto, se han adherido partes de la propia cubierta protectora de polietileno en las zonas de agarre de las mordazas a modo de talones.

## **5.2. De las pruebas de cargas sucesivas y el efecto Mullins**

Lo más notorio del ensayo de cargas sucesivas sin el incremento de la fuerza es sin duda el cambio de progresión de las curvas a diferente velocidad.

A muy baja velocidad, (0,11 mm/s, figura [3.5](#)) donde a medida que los ciclos se suceden cada curva queda por encima de la anterior dando la impresión de que a medida que se suceden los ciclos a muy baja velocidad el material tiende a endurecerse. No obstante, la pendiente de la curva no se ve modificada, (ni por efectos de endurecimiento por tracción ni por el efecto Mullins) sino más bien lo que sucede es que la tensión de partida se incrementa a cada ciclo.

Dicha pretensión puede deberse a efectos relacionados con la estructura del polímero, donde a muy bajas velocidades puede darse una recolocación de las cadenas ocasionando una contracción de la longitud inicial, la cual se trasladaría a la lectura como una pretensión.

Otra opción para explicar el fenómeno puede ser la atribución del susodicho a un efecto viscoelástico, aunque parece menos probable debido a la baja velocidad de deformación que experimentaba el material durante el ensayo (teniendo en cuenta que la componente viscoelástica de los polímeros se desarrolla en su plenitud a relativamente elevadas velocidad de deformación).

El ensayo se ha repetido dos veces para comprobar que el evento no se debiera a la máquina de ensayos o al procedimiento arrojando los mismos resultados en las dos pruebas.

Si se compara el caso anterior con el caso ilustrado en la figura [3.6](#), se observa que a estas velocidades (1 mm/s) desaparece dicho efecto: ahora las cargas no se suceden una tras otra consecutivamente hacia arriba, sino que mantienen su origen en común como se espera y alcanzan para la deformación máxima niveles de tensión parecidos.

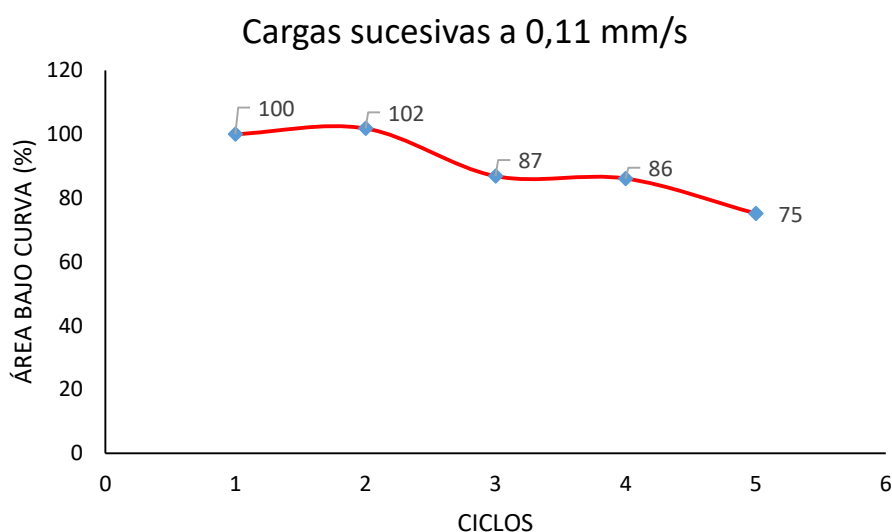
La superación del primer nivel de tensión para el 90,9% de deformación de la carga 1 por el resto de cargas puede deberse a un fallo de la célula de carga (teniendo en cuenta la baja sensibilidad de esta, una variación de 4 kPa no son significativos) o que realmente por otros efectos se hallan alcanzado tales niveles de carga.

Si se centra la atención en el tramo del eje de deformación que comprende desde el cero hasta el 50% se puede notificar un acusado cambio de la concavidad de las curvas tensión deformación a medida que se suceden los ciclos. Dicho cambio se traduce en un ablandamiento incremental del material que se incrementa a medida que se aumenta el número de ciclos y nunca se deshace.



Dadas las características descritas, parece ser que se trata del efecto Mullins, cuando, al haber alcanzado los ciclos 2, 3 (no dibujado), 4 y 5 niveles de tensión superiores al primero, el material pasa a ablandarse de manera irreversible, por lo que se puede concretar que, durante al menos cinco ciclos, el efecto Mullins aparece reduciendo incrementalmente el área bajo curva del material. Esta pérdida se puede cuantificar integrando el área bajo curva desde la deformación cero hasta el 50% de los polinomios de ajuste de las curvas.

Realizando dicho cálculo se tiene una aproximación del área bajo curva perdida en esa región en términos de la función densidad de energía de deformación:



*Fig. 5.1: Área bajo curva remanente respecto de la primera carga por el efecto Mullins.*

Como se puede observar, tras el quinto ciclo de carga a 1 mm/s, se ha perdido un 25% del área bajo curva en el tramo de deformación [0, 50%] debido al ablandamiento ocasionado por el efecto Mullins.

Cuando se observa la gráfica [3.7](#), se puede observar que a 5 mm/s se puede advertir como ahora la tendencia denotada en el ensayo a 0,11 mm/s se ha revertido completamente y en este caso, a cada carga que se le da al material, la curva correspondiente de cada ciclo va quedando por debajo del inmediatamente anterior.

Este fenómeno puede ser debido o bien al efecto Mullins o bien a la distensión ocasionada por la alta velocidad de deformación. Como se está ante una deformación rápida, no se puede atribuir este suceso en su totalidad al efecto Mullins o a otras componentes viscoelásticas, ya que es factible que ambas se den a la vez en estos rangos de velocidad siendo este la suma de todos los efectos dados.

En cualquiera de los casos, lo que sí se puede concluir, es que la curva del material parece indicar que este se ablanda con el transcurso de los ciclos rápidos en contraposición con lo acontecido en el experimento a baja velocidad.

Respecto al ensayo de las cargas sucesivas con incremento de la fuerza, no se puede concretar nada decisivo, puesto que el ensayo no muestra una clara variación de las curvas. No obstante, esto puede ser debido a la sensibilidad de la máquina, ya que, al

momento de realizar la prueba, sí que se podía observar in situ como el trazador dibujaba la segunda carga por encima de la primera descarga y por debajo de la primera carga, confirmando el ablandamiento.

Es posible que, por problemas de escalado al momento de realizar el gráfico o por un problema de sub-muestreo en la adquisición de datos, se haya perdido resolución y no se distinga la diferencia entre curvas.

### **5.3. De los ciclos de carga y descarga y el fenómeno de histéresis**

Los ciclos de carga y descarga a tracción simple, han arrojado resultados que son concordantes con los obtenidos en los del subcapítulo anterior.

En el caso de los ciclos de carga y descarga a 0,11 mm/s (figura [3.9](#)), vuelve a darse el mismo suceso que en el ensayo de tracción lenta a muy bajas velocidades: a medida que los ciclos se suceden, las curvas asociadas se van dibujando cada vez más arriba indicando que se parte de una pretensión gradualmente incrementada.

Si se observa el tamaño del ancho de histéresis, se puede advertir que este, de manera aproximada, permanece constante a pesar de la sucesión de ciclos, por otro lado, todas las cargas son paralelas entre sí, al igual que las descargas.

Para confirmar si el ancho de histéresis es constante, se ha recurrido a los cálculos efectuados en el subcapítulo 4.1, donde los resultados se han plasmado en el diagrama [4.3](#), donde se puede observar que la variación de la densidad de energía de deformación (y con ella el ancho de histéresis) permanece constante entre los ciclos 2 y 3 y entre los ciclos 4 y 5. Sin embargo entre el ciclo 3 y 4 parece haber ocurrido alguna eventualidad que ocasiona una disminución abrupta de la disipación (un 6,27% del ciclo 3 al 4).

No obstante, en términos generales, se puede considerar que una variación total de 8,13 puntos no es significativa pudiendo considerar, con la salvedad del salto entre el ciclo 3 y 4, que el fenómeno de histéresis es constante e independiente del número de ciclos.

Si se sigue escrutando el gráfico de la figura [3.10](#) se puede observar, que de nuevo acontecen los mismos sucesos que en el ensayo de cargas sucesivas para una velocidad de 5 mm/s: por efectos de distensión y/o el efecto Mullins, el ciclo 5 aparece por debajo y con una pendiente de carga disminuida respecto del ciclo 1.

Volviendo a estudiar el ancho de histéresis en este caso (aproximadamente constante si se observa el gráfico [3.10](#)), se tiene que, de nuevo, entre el ciclo 3 y 4 vuelve a existir una variación abrupta del ancho, pero esta vez, el ancho se tiende a agrandar en lugar de a reducirse se pasa de una disipación de energía por histéresis del 61,15 % para el ciclo 1 al 72,28% para el ciclo 5).

Esto puede ser debido a la distensión del material, el cual podría haber falseado la curva de descarga al ser dependiente esta no solo de la disminución de la tensión sino también del tiempo de recuperación del material.

Hablando en términos de diferencia de energía entre la carga y la descarga se tiene que se está disipando para los ciclos a 0,11 mm/s un  $23,27 \pm 4,19$  % de la existente al

momento de finalizar la carga y un  $65,87 \pm 4,80$  % para los ciclos a 5 mm/s. Esto supone una gran capacidad de disipación de energía por mecanismos de histéresis.

Para concretar, se puede concluir que el ancho de histéresis es aproximadamente constante e independiente del número de ciclos, pero sí dependiente de la velocidad de deformación, obviamente imprimir una mayor energía cinética, se traduce en una mayor energía de deformación.

Si se continúa estudiando el ensayo de los ciclos de carga y descarga a tracción y a compresión, se puede observar, en la figura 3.11, que a 0,22 mm/s los ciclos no se desplazan hacia arriba en la gráfica, sino que se mantienen centrados en torno al origen, de nuevo, el ciclo tiene un ancho constante e independiente del número de ciclos.

En el caso de los ciclos a 10 mm/s (figura 3.12), se puede observar que la forma del ciclo permanece constante, aun cuando el ciclo 150 queda situado por encima del ciclo 1 (figura 3.13), lo que puede ser debido a un efecto de endurecimiento parecido al acontecido en el ensayo de cargas sucesivas a 0,11 mm/s, no obstante, es curioso ver que, de ser así, se está dando a muy alta velocidad en lugar de a baja velocidad.

Puede ser debido también a un fallo de la máquina, ya que, en este ensayo, el instrumental ha sufrido vibraciones y cambios de aceleración muy próximas a sus límites de trabajo.

#### **5.4. De los ensayos de respuesta en función del tiempo**

En el presente subcapítulo se analizarán de una parte, el ensayo de relajación del subcapítulo 3.7, y de otra, los estudios de la respuesta a diferentes impulsos del VHB® que figuran en el subcapítulo 3.8

Empezando por el ensayo de relajación, se puede comentar que, al mantener la deformación constante en el material, este empieza a experimentar una relajación de la tensión de manera inmediata. Una vez la probeta lleva un cierto tiempo en dicha posición (90,9% de deformación), la tensión deja de decrecer y se vuelve constante.

Con ayuda de la gráfica 3.16, en la que se muestra la tasa de decaimiento de la tensión con el tiempo, se puede determinar que a partir de los 100 segundos aproximadamente, la tasa de cambio de la tensión se vuelve cero y la tensión alcanza una asíntota en 10 kPa.

La utilidad de conocer estos datos podría venir dada por el interés de emplear este tipo de materiales en la fabricación de actuadores controlados en fuerza. Hasta ahora, la construcción pensada para este tipo de actuadores pasa por estimular el material mediante una corriente eléctrica aprovechándose del fenómeno de electro-estricción para inducir una deformación en el material proporcional a la corriente empleada.

Ahora, si lo que se desea es mantener una tensión constante para una posición dada, se sabe gracias a este tipo de ensayos, que resulta imposible.

No obstante, si lo que se desea es conocer la evolución de la tensión con el tiempo para una posición dada, se pueden obtener datos cuantitativos a partir de la gráfica [3.15](#) que permiten estimar qué tensión se dará para un cierto tiempo dado.

Si se emplea un ajuste potencial sobre las gráficas Tensión vs. Tiempo y Stress rate vs. Tiempo, se puede obtener información para definir los parámetros de un posible controlador.

Por ejemplo, si se toman de las curvas anteriormente mencionadas un intervalo que comprenda desde el final de la carga inicial (10 segundos) hasta un punto muy alejado donde las curvas se tiendan a una constante (480 segundos), se obtienen las siguientes funciones definidas en el intervalo [10,480] con las unidades de tensión en kPa y las de tiempo en segundos:

$$\sigma(t) = 139.36t^{-0.457} \quad (5.1)$$

$$\dot{\sigma}(t) = 139.96t^{-1.456} \quad (5.2)$$

De ambas expresiones se pueden obtener la tensión y la tasa de cambio de esta para cada instante  $t$  que se encuentre entre 10 y 480 segundos.

Por lo tanto, estas expresiones se pueden incorporar a un hipotético controlador con el objetivo de controlar que tensión está sufriendo el material para una deformación dada por una corriente en un instante determinado.

Es muy posible, que la relajación dependa, por varios efectos de la viscoelasticidad, de la deformación previamente alcanzada, pero por medio de la repetición de este ensayo, se puede obtener una suerte de curva maestra con las tasas de relajación características para cada deformación.

Dejando de lado el ensayo de relajación y continuando con los ensayos de respuesta a impulsos, se puede advertir como varía la tensión sufrida por el material frente a la variación de la deformación experimentada por este en las figuras [3.17](#) y [3.18](#).

Si el gobierno de un hipotético actuador realizado con este material se realizase mediante el control en posición, se podría esperar que frente a una señal cuadrada el actuador experimentaría a cada flanco de subida un importante pico de tensión, lo que resultaría en un posible daño (por fatiga o por alcanzar la tensión máxima de trabajo) del actuador cuando estos ciclos se sucediesen en el tiempo.

Además, se ve claramente en la figura [3.17](#) como a cada ciclo, la tensión alcanzada es mayor, lo cual es fácilmente atribuible a la distensión sufrida por el material dados las altas velocidades de deformación presentes.

Una distensión rápida causa también que la recuperación inicial sea rápida, es decir, causa que el material empiece a recuperar su longitud original con una tasa de

recuperación inicialmente alta, para después continuar recuperándose con tiempos cada vez mayores.

Este efecto restaurador en el material puede estar ocasionando una fuerza en la dirección contraria a las mordazas suponiendo que, la máquina necesitase desarrollar más tensión para alcanzar los niveles de deformación alcanzados anteriormente.

Si se pasa a la gráfica 3.18, se puede observar como estos efectos se atenúan cuando la posición está controlada por una función sinusoidal, desapareciendo los picos y quedando la tensión constante. No obstante, en este caso, se aprecia claramente un desfase entre el ciclo de deformación y el de tensión. La deformación está adelantada a la tensión, lo que puede ocasionar problemas de deriva en un hipotético controlador.

Para completar estos ensayos, sería necesario evaluar la fluencia lenta del material a tensión constante, lo cual daría una idea de cuánto tiempo podría un controlador de este material mantener una tensión sin que se produzca un fallo por rotura. En el subcapítulo [5.10.2.1](#) se detalla la información relativa a la realización de un experimento orientado a investigar estos aspectos que desgraciadamente ha quedado propuesto para trabajos futuros debido a la falta de instrumental adecuado para su realización.

## **5.5. De los ensayos de fatiga mecánica**

En las gráficas [3.19](#) y [3.20](#) se puede observar las variaciones de la curva tensión-deformación tras la realización de cierto número de ciclos sobre el material.

Si se evalúan las curvas graficadas sin esperar ningún tiempo entre la finalización de los ciclos y el ensayo de tracción, se puede observar un claro empeoramiento de las propiedades mecánicas a medida que aumenta el número de ciclos.

Una vez más, el problema de la viscoelasticidad es un factor determinante en el ensayo, ya que las propiedades mecánicas exhibidas dependen mucho del tiempo de recuperación y la distensión alcanzada ocasionada por los esfuerzos previos.

Al no existir tiempo de recuperación, el material cada vez requiere de menos tensión para alcanzar las mismas cotas de deformación. Esto puesto en el contexto de futuras aplicaciones parece suponer una clara limitación a la hora de diseñar actuadores o aplicaciones estructurales en los que este material se vea involucrado.

Si estas aplicaciones requieren, por sus características de operación, de estar en un funcionamiento continuo, es preciso tener en cuenta que su respuesta se verá progresivamente empeorada con el transcurso de los ciclos si entre ellos no se le permite al material recuperarse.

No obstante, la tónica cambia si se permiten largos tiempos de recuperación entre ciclos. Si se compara la curva a 1000 ciclos de las dos gráficas se puede observar como un periodo de recuperación de 72 horas (y probablemente de menos) hace recuperar a la probeta prácticamente el nivel de operación del material virgen (con cero ciclos sin contar el ensayo a tracción inicial).

Por otro lado, se observan, en las probetas que han sufrido 1000 y 2000 ciclos, un ablandamiento ya irreversible que puede haber sido causado probablemente por el efecto Mullins, ya que es improbable que se declare fatiga en un elastómero con un número tan contenido de ciclos, sobre todo teniendo en cuenta la relativamente baja intensidad de estos (-20 kPa, +30 kPa).

Luego se puede concluir que el efecto Mullins y otros deterioros detonados por la sucesión de ciclos dificultan la predicción del comportamiento del material, al mismo tiempo que se concluye que la historia mecánica afecta al comportamiento mecánico futuro.

## **5.6. De los ensayos de caracterización termo-mecánica**

Los ensayos a diferente temperatura, aunque contenidos en extensión, ya que se podrían haber ampliado a más rangos de temperatura y de velocidad de deformación si se hubiera dispuesto de más tiempo, han arrojado datos esclarecedores sobre la capacidad de recuperación del material.

Por una parte, en el caso de los ensayos realizados a alta temperatura se puede observar cómo mantener el material a una temperatura nada extrema durante largos periodos de tiempo menoscaba gravemente el comportamiento a tracción del material (figura [3.21](#)).

Pero, por el contrario, se puede observar al mismo tiempo como el material goza de una excelente capacidad de recuperación, necesitando tan solo 25 minutos para ver su curva de tensión-deformación casi completamente restaurada a niveles previos al tratamiento térmico (figura [3.23](#)). Además, se ha comprobado cómo al dejar pasar una larga cantidad de tiempo en comparación con la duración del tratamiento (72 horas frente a 24), el material recupera sus propiedades completamente sin que queden secuelas fruto de dicho tratamiento.

En el caso de los ensayos a baja temperatura, se puede comprobar que, muy probablemente, se ha reducido la temperatura del material por debajo de la temperatura de transición vítrea, ocasionando un aumento de la rigidez en el material, pasando este a mostrar una curva más propia de un metal que de un elastómero (figura [3.25](#)).

Tras un breve periodo de recuperación (25 minutos) los niveles de la curva del material regresan a los que tenía antes del tratamiento, lo que de nuevo exhibe una buena capacidad de recuperación del material no apreciándose que el tratamiento de un día de duración haya afectado de manera irreversible al comportamiento mecánico.

Cierto es, que un ensayo de tracción en una cámara climática habría permitido mantener las bajas temperaturas durante el ensayo evitando añadir a este las interferencias generadas por efecto del calentamiento progresivo del material, pero por motivos de falta de material no ha podido ser realizado de esta manera.

Para concretar, se puede añadir que, respecto de los ensayos a alta temperatura, se advierte un acusado menoscabo de las propiedades mecánicas cuando el material trabaja a 42°C, lo que puede ser un problema para ciertas aplicaciones, como por ejemplo aquellas relacionadas con biotejido, ya que el cuerpo humano puede alcanzar,

frente a una violenta fiebre, esa temperatura con facilidad. Además, una temperatura de 42°C es fácilmente alcanzable en el exterior en ciertas localizaciones geográficas, limitando mucho el uso a la intemperie de este material para posibles aplicaciones.

Del ensayo a bajas temperaturas se puede concretar basándose en el cambio de comportamiento, que la temperatura de transición vítrea del material se encuentra en algún punto situado entre 249K y 295 K.

Asimismo, de los dos ensayos, se puede extraer la conclusión de que el comportamiento mecánico del material no se ve afectado por la historia térmica de este, al menos, para estas duraciones de los tratamientos.

## **6. CONCLUSIONES**

### **6.1. Conclusiones generales**

Para sintetizar, se presentan a continuación las conclusiones principales extraídas del presente trabajo fin de grado:

#### **A. Comportamiento general**

1. El material electroactivo considerado, polímero VHB, puede experimentar grandes deformaciones con bajos niveles de carga, los cuales no están relacionados linealmente. Dadas los grandes niveles de deformación alcanzables sin que se produzca rotura y la forma de las curvas tensión-deformación, se puede considerar como un sólido hiperelástico.
2. La curva tensión-deformación del material presenta una dependencia no lineal con la velocidad de deformación, aumentando sus valores de tensión a medida que aumente dicha velocidad, dicho comportamiento es característico de otros elastómeros.
3. Basándose en los ensayos de tracción simples realizados, el material presenta diferentes propiedades mecánicas en su dirección transversal de las exhibidas en su dirección longitudinal, ya sea debido a una anisotropía o a efectos del apilado de las probetas.

#### **B. Viscoelasticidad y efecto Mullins**

4. A muy bajas velocidades de deformación (0,11 mm/s, y debido a efectos viscoelásticos), el material incrementa su pretensión de partida.
5. A bajas velocidades de deformación (1 mm/s), se puede observar un ablandamiento ocasionado por el efecto Mullins, el cual se da con independencia de la velocidad de deformación y se reduce conforme se suceden los ciclos sobre el mismo material. Resulta de importancia, considerar dicho efecto para la proposición de modelos predictivos del comportamiento de este material, así como en el diseño de aplicaciones concretas.
6. A altas velocidades de deformación, adicionalmente al efecto Mullins se le acoplan efectos relacionados con la viscoelasticidad, que ocasionan en la gráfica tensión-deformación una reducción del área bajo curva y un cambio en la pendiente de la misma. Por ello, tener en cuenta parámetros del modelo viscoelástico empleado para ilustrar el problema (como el modelo de Bergström y Boyce en este caso), puede ser crucial, dichos parámetros son: la atenuación del efecto Mullins (en intensidad y en número de ciclos necesarios) y el tiempo de recuperación entre los más destacables.



### **C. Histéresis**

7. La energía disipada por histéresis representa buena parte de la energía dada por la carga original del material, haciendo a este material un formidable candidato para aplicaciones que requieran de una buena capacidad de absorción de energía (aplicaciones de impacto).
8. El ancho de histéresis se puede suponer constante, independientemente de si el material trabaja a tracción o a compresión o el número de ciclos, y dependiente de la velocidad de deformación.

### **D. Comportamiento dinámico del material**

9. El material es incapaz de mantener una tensión durante un tiempo indefinido para una deformación constante, no obstante, es posible cuantificar y predecir la evolución del decremento de dicha tensión.
10. La evolución del perfil de deformación respecto del tiempo es decisiva para predecir el desarrollo de la tensión en el material. Alcanzar la deformación de manera súbita, puede resultar en daños del material por exceso de esfuerzo.
11. Cuando se suceden sobre el material ciclos de fatiga, las propiedades del material se ven afectadas si no existe un tiempo de recuperación, no obstante, si se da ese tiempo de recuperación, la única variación apreciable en los niveles a los que se han efectuado los ensayos son los dados por el efecto Mullins.

### **E. Propiedades termo-mecánicas del material**

12. El material cambia severamente su comportamiento frente a cambios de temperatura relativamente sensibles, no obstante, la historia térmica del material no afecta al futuro comportamiento mecánico de este. Estas características parecen impedir que el VHB® resulte operativo para temperaturas muy diferente a la temperatura ambiente.
13. Si la corriente eléctrica que pase por el material hace que se incremente la temperatura de este, puede desencadenarse un empeoramiento de las propiedades mecánicas por acción del calor generado por dicha corriente.

Con las conclusiones ya expuestas, se dan por satisfechos los objetivos planteados al comienzo de la memoria al mismo tiempo que se han respetado las hipótesis de partida impuestas.

## 6.2. Discusión final

Dadas las conclusiones obtenidas, se puede atisbar cómo muchas de las aplicaciones originalmente propuestas por la literatura para estos materiales quedan aún lejos de la realidad, ya que, en muchos casos, el material adolece de una carencia importante en sus características mecánicas para cumplir con ciertas características de operación.

Por ejemplo, en el caso del desarrollo de actuadores, la incapacidad de mantener la tensión constante, la distensión, la variación de las propiedades con la temperatura, el ablandamiento por el efecto Mullins o por la repetición de ciclos alejan a los materiales como el VHB® del concepto de actuador ideal.

No obstante, este material goza de buenas propiedades para cumplir funciones no como un actuador de uso intensivo, sino más bien como uno que preste servicio de una manera más eventual.

Ciertas propiedades como la maleabilidad o adherencia pueden ser ventajosas para ciertos diseños (sensores de fuerza, pequeños actuadores de uso puntual o de un solo uso).

En el caso de las aplicaciones dirigidas al campo de la biomédica, cabe decir que, aunque consta en la literatura como material biocompatible, este material tiene ciertas propiedades que quizás no lo hagan óptimo para su uso en dicho campo.

Aunque ha habido tentativas, y ciertos éxitos parciales, en la creación de corazones artificiales con materiales de naturaleza similar, no parece que este material sea apto para tolerar ciclos continuos como los que se le exige a un músculo cardíaco,

Además, no se debe olvidar, como elevar la temperatura de operación a umbrales próximos a los del cuerpo humano afectan severamente al comportamiento del material.

Por otra parte, se ha observado como el material presenta una buena capacidad de absorción de energía, por lo que quizás sea interesante estudiar su uso en aplicaciones de absorción de impacto (modelado de órganos y análisis del daño, diseño de estructuras protectoras frente a impacto, estudio de vibraciones, ...).

En el subcapítulo 5.10, dedicado a trabajos futuros, se amplía la información referente a los estudios de impacto para el VHB®.

Para concluir, comentar que según se puede apreciar tras una revisión ligera del estado del arte, los esfuerzos investigadores están quizás demasiado orientados a un enfoque eléctrico del material motivado por los fenómenos de electrostricción, cuando sin embargo no se está prestando mucha atención a factores decisivos del comportamiento del material como son los aspectos mecánicos de este. Por ello quizás, sería necesario replantearse el camino a seguir.

### **6.3. Análisis socio-económico**

#### **6.3.1 Entorno global del impacto económico**

El análisis socio-económico distingue dos partes, por un lado, la parte que valora a nivel interno el esfuerzo económico y humano realizado y por otro, la parte que se centra en estudiar la posible proyección de las conclusiones extraídas sobre la sociedad y la economía a nivel industrial, científico y económico.

Valorar el impacto de un trabajo de carácter experimental y orientado a la investigación es siempre complicado. Concretamente la dificultad reside en cuantificar la utilidad y el valor de las aportaciones realizadas al estado del arte.

En lo que a este trabajo respecta, cabe decir que el esfuerzo invertido, tanto económico como humano se ve compensado por los resultados obtenidos, esto es así debido a que, a un relativo bajo coste y uso de recursos, se han podido extraer numerosas conclusiones de unas pocas pruebas.

Esto resulta provechoso para continuar las investigaciones sobre los elastómeros dieléctricos, ya que, según respalda el presupuesto del proyecto, no se requiere de un instrumental excesivamente complejo, técnicas muy vanguardistas ni un gran desembolso para continuar las investigaciones.

Lo que esto implica es la posibilidad de dedicarle todavía más esfuerzo a la investigación, lo cual podría generar todavía mejores resultados, más precisos y extensos.

Continuar dichas investigaciones supondría quizás llegar al modelado descriptivo integral de los elastómeros dieléctricos, pudiendo con ello llegar a implementar gran parte de las ideas que están actualmente en desarrollo.

De ser así, ya se podría hablar de una proyección de beneficios hacia la sociedad, para empezar, surgirían nuevas alternativas a tecnologías que a día de hoy ya se encuentran implantadas. Estas nuevas alternativas pueden suponer o bien una mejora significativa de ciertas tecnologías, causando la obsolescencia de las existentes, o bien pasar a formar parte de una tecnología complementaria a la actual.

Trabajos como este, no hacen sino sumar aportaciones que se encaminan hacia tales metas, por lo que se quiere suponer que el impacto a nivel social es positivo, ya que se está intentando posibilitar una tecnología que puede simplificar actuales sistemas complejos y caros.

En términos económicos e industriales, conviene sacar a colación el creciente interés en el mercado industrial por los polímeros electro-activos con carácter general, luego, invertir en investigación en dichos materiales, no puede reportar sino beneficios.

Al ser unos materiales a los que cada vez se les está encontrando más utilidades y los cuales se están negociando en volúmenes cada vez mayores, no parece muy errado suponer que la información requerida sobre el comportamiento de estos irá progresivamente en aumento.

Por ejemplo, en la siguiente imagen se muestra el volumen negociado y beneficio obtenido por el mercado global de un conocido PEA, el PVDF. Las previsiones arrojan que el volumen de negociación se ha disparado exponencialmente al alza desde el 2014.

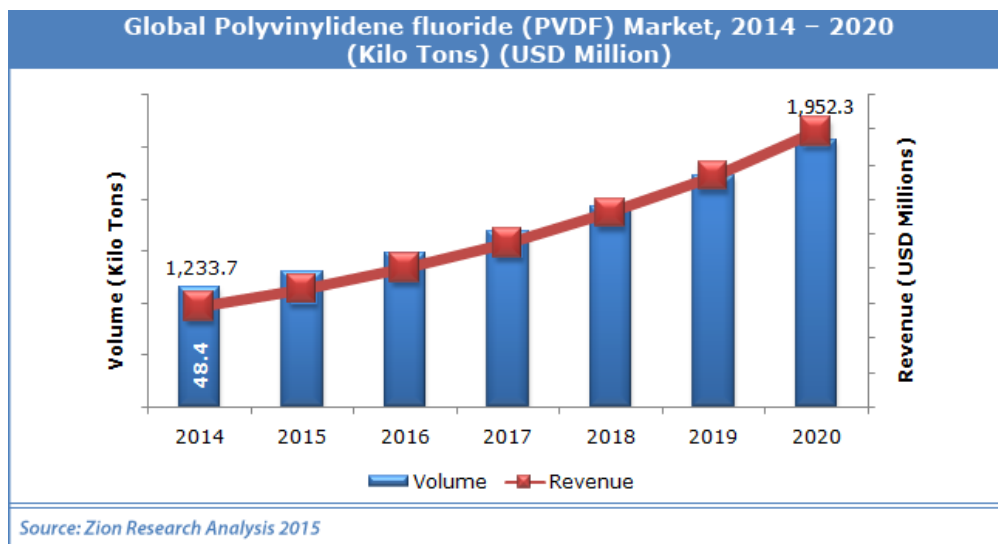


Fig. 6.1: Volumen global negociado de PVDF con previsiones hasta 2020 [34].

Para concluir, resta decir que, en términos de impacto económico, la aportación de trabajos como este será positiva si las contribuciones investigadoras estimulan el interés económico sobre este tipo de materiales, lo cual a su vez traería aparejado una mayor necesidad de información lo que fomentaría nuevamente la investigación.

### 6.3.2. Presupuesto

A continuación, se presenta el presupuesto del trabajo para que sirva para estimar el coste real de este trabajo si se hubiera realizado de manera profesional, o, por el contrario, de manera orientativa para comprobar el dinero que le ha costado a la Universidad el conjunto de la investigación. Antes de presentar las tablas de costes, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se ha asignado el trabajo a un ficticio ingeniero junior con un sueldo estimado de 35€/hora para acotar el coste de capital humano.
- Las horas de tutoría han sido computadas a 35€ por el sueldo del supuesto ingeniero junior más unos hipotéticos 45€/hora simbolizando la dedicación del tutor como ingeniero senior.
- Al momento de utilizar las máquinas propiedad de la Universidad, ya se encontraban en avanzado proceso de amortización, aun así, no se ha tenido esta en cuenta al momento de reflejar el precio de la instrumentación.
- Se ha incluido todo el material fungible empleado para las pruebas tanto las que han sido definitivas como las de caracterización inicial.
- Se han incluido los paquetes informáticos empleados en la realización del trabajo como si hubieran sido adquiridos expresamente para tal efecto.

- Se han incluido los costes de fabricación y diseño del útil de fijación en el presupuesto debido a que ha sido expresamente fabricado para ensayos de esta naturaleza. Los costes por hora de ambos han sido de 13€.
- Los costes de materiales incluyen el 21% de IVA, mientras que el coste de la hora de trabajo se supone en bruto.

ITEM		1. CAPITAL HUMANO		COSTE	COSTE TOTAL	
#	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	unitario	excl. IVA	incl. IVA
1	Hora Ing Junior	Horas de trabajo totales	300	35 €	10.500 €	N/A
2	Hora Ing Senior	Horas de tutoría y coordinación de tareas.	25	45 €	1.125 €	N/A
3	Hora diseño útil	Proceso de diseño y diseño CAD del útil.	5	13 €	65 €	N/A
4	Hora fabricación útil	Horas de fabricación del útil	3	13 €	39 €	N/A

ITEM		2. MATERIAL FUNGIBLE		COSTE	COSTE TOTAL	
#	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	unitario	excl. IVA	incl. IVA
5	VHB 4910F 3m	CINTA 3000 mm x 19 mmx 1 mm	1	24,38 €	24,38 €	29,50 €
6	VHB 4910F 11m	CINTA 11000 mm x 19mmx 1mm	2	31,88 €	31,88 €	38,57 €
7	VHB 4910F 33m	CINTA 33 m x 6mmx 1mm	1	26,33 €	26,33 €	31,86 €

ITEM		3. INSTRUMENTOS		COSTE	COSTE TOTAL	
#	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	unitario	excl. IVA	incl. IVA
8	ÚTIL DE FIJACIÓN	Fabricación a medida: costes fijos y materiales	1	200 €	200 €	242 €
9	MÁQUINA DE ENSAYOS	SERVOSIS ME401/1 + Célula de carga de 10 KN	1	25.000 €	25.000 €	30.250 €
10	CÁMARA CLIMÁTICA	INSTRON CEART	1	6.000 €	6.000 €	7.260 €

ITEM		4. INFORMÁTICA Y SERVICIOS		COSTE	COSTE TOTAL	
#	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	unitario	excl. IVA	incl. IVA
11	PAQUETE MS® OFFICE®	Versión profesional 2016; 1 licencia	1	157,02 €	157,02 €	189,99 €
12	MS® PROJECT® 2019	Para el diagrama de Gantt y la gestión de tiempo	1	701,65 €	701,65 €	849,00 €

ITEM		5. OTROS GASTOS		COSTE	COSTE TOTAL	
#	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	unitario	excl. IVA	incl. IVA
13	ENVÍO VHB	Costes envío y manipulación	3	4,12 €	12,37 €	14,97 €

Tabla 6.1: Desglose del presupuesto.

SUBTOTALES		SIN IVA	CON IVA
1. CAPITAL HUMANO (1+2+3+4):		11.729 €	11.729 €
2. MATERIAL FUNGIBLE (5+6+7):		82,59 €	99,93 €
3. INSTRUMENTACIÓN (8+9+10)		31.200 €	37.752 €
4. APLICACIONES INFORMÁTICAS (11+12):		858,67 €	1.038,99 €
5. OTROS GASTOS (13):		12,37 €	14,97 €
COSTE TOTAL (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11+12+13):		43.882,63 €	50.635 €

Tabla 6.2: Costes totales del proyecto.

Se puede observar que el coste total es algo elevado debido a la partida de los instrumentos de ensayo, pero, por otra parte, el instrumental empleado es corriente encontrarlo en laboratorios de caracterización mecánica comúnmente disponibles en universidades y otros centros de investigación dedicados a esta línea de investigación.

Por lo que, para estas instituciones, el coste a tener en cuenta sería algo menor suponiendo que los instrumentales se encuentran amortizados al momento de la realización de la investigación y que el paquete informático empleado es también comúnmente usado en cualquiera de estas instituciones, por lo que sumarían los subtotales de CAPITAL HUMANO, MATERIAL FUNGIBLE, y OTROS GASTOS con un total de 11.823,98 € sin IVA y de 11.843,90 € con impuestos incluidos.

## **6.4.Trabajos futuros**

Tras los trabajos realizados y las conclusiones obtenidas, se han pensado numerosos trabajos accesorios con posibilidad de ser realizados a continuación del presente que, sumados a las ideas que han ido surgiendo conforme se avanzaba en la experimentación componen una amplia variedad de ideas para para contribuir al estudio de los elastómeros dieléctricos.

Los trabajos futuros bosquejados se centran a grandes rasgos en ampliar la caracterización mecánica del material, con el añadido de ampliar el estudio mediante enfoques acoplados para observar la interrelación de las propiedades directamente, de esta idea surge la posibilidad de realizar ensayos electro-mecánicos o termo-eléctricos, o continuar con los ensayos termo-mecánicos.

Por otra parte, sería interesante continuar con la caracterización mecánica ampliando los experimentos actuales, los cuales no han podido ser plenamente aprovechados debido a las limitaciones de la instrumentación actual o debido a la limitación en tiempo disponible para la realización del presente TFG y a la necesidad de acotar los objetivos del mismo.

### **6.4.1. Continuación de los trabajos de caracterización mecánica conducidos**

En primer lugar, vistas las limitaciones de la máquina de ensayos universal, habría sido interesante continuar con los mismos ensayos con una máquina de mayor recorrido para lograr llevar las probetas a rotura obteniendo así la curva tensión-deformación completa.

Además, una célula de carga de menor ancho de escala y mayor sensibilidad habría evitado la necesidad de realizar un apilado de probetas para medir la tensión, una célula de 500 N con una sensibilidad de 1/500 de la escala habría sido más que suficiente.

El emplear una máquina más apropiada también habría permitido realizar un ensayo de relajación a carga constante para evaluar la posibilidad de rotura por un mantenimiento de la fuerza prolongada, lo cual sería un factor clave para el diseño de actuadores.

Asimismo, la posibilidad de acoplar a la nueva máquina una cámara climática permitiría controlar la temperatura de los ensayos de tracción y brindaría la oportunidad de estudiar las propiedades a diferentes temperaturas, con esto, se podrían obtener las curvas de comportamiento a diferentes temperaturas lo que serviría para obtener información decisiva sobre el comportamiento general del material.

Respecto de los ensayos de fatiga mecánica, cabe decir, que, si se dispusiera de más tiempo, se podrían realizar muchos más ciclos sobre el VHB® llegando quizás a fatigar el material hasta rotura.

## 6.4.2. Nuevos ensayos de caracterización mecánica

Debido nuevamente a las limitaciones del instrumental, se han quedado sin investigar algunos aspectos del material que son directamente relacionables con los desarrollados en el presente trabajo, de todos, destacan dos posibles comportamientos que serían fácilmente desarrollados si se dispusiera de una máquina de ensayos con mayor recorrido y sensibilidad: el fenómeno de *creep* o fluencia lenta, y la posible aparición de sinergias.

### 6.4.2.1. Estudio de la fluencia lenta a tensión constante

El fenómeno de fluencia lenta se da en los elastómeros dieléctricos de forma generalizada, este consiste en el aumento de la elongación cuando el material se mantiene a una tensión constante.

Esto es debido al desenredado lento de las cadenas moleculares del material, y junto al efecto Mullins y a la histéresis, ocasiona de nuevo problemas para el diseño de los supuestos sistemas de control para estos materiales inteligentes. Este fenómeno hace inestable cualquier sistema de control, produciendo por ende, una respuesta impredecible [23].

Para estudiar este fenómeno, junto a una posible relajación de la tensión experimentada por el material, se puede conducir un ensayo empleando una máquina de ensayos universal que tenga recorrido suficiente para mantener una fuerza de 5 N durante 3600 segundos para el testeo de una probeta tipo 2 según la norma ISO 527-3, la cual se ha deformado mediante tracción uniaxial a una velocidad de 1,67 mm/s para posteriormente, mantenerla en ese estado de carga durante 3600 s [23].

Las fuerzas a las que se sometería la probeta se sugieren de 1, 2, 3, 4 y 5 N y los datos obtenidos de fuerza y deformación pueden ser comparados mediante gráficas con el tiempo transcurrido

A partir de los datos se pueden obtener el módulo de fluencia lenta (*Creep modulus*), medido en kilopascales, y la tasa de deformación por fluencia lenta (*Creep strain rate*), medida en segundos a la inversa. El módulo de fluencia lenta se expresa como la tensión total aplicada a carga constante dividido entre la deformación total experimentada:

$$E_r(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad (6.3)$$

Por otro lado, la tasa de deformación por fluencia lenta, es la velocidad a la que se deforma el elastómero a carga constante en función del tiempo dividida entre la longitud inicial:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{L(t) - L_0}{L_0} \right) = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt}(t) = \frac{v(t)}{L_0} \quad (6.4)$$

La motivación de partida para la realización de la prueba sería la de obtener datos de debilitación del material en función del tiempo, lo que se espera que aporte información

útil para las limitaciones de diseño de las futuras aplicaciones en las que se emplee este material o similares.

Este ensayo permite replicar los resultados obtenidos por otros autores [23] confirmando el evento de rotura por fluencia lenta a 5 N para un área de 19mmx1mm lo que supone una limitación de mantenimiento de la fuerza durante un tiempo indefinido, algo que supone un gran problema para desarrollo de actuadores que precisen cumplir este tipo de características de operación.

#### 6.4.2.2. Estudio de aparición de sinergias en el material

El VHB® es un material adhesivo, no solo en sus caras, sino en todo su volumen, tanto es así que, si se le practica un corte, las caras nuevas que queden al aire siguen siendo adhesivas.

Tras una prueba de compresión realizada en el laboratorio con una máquina universal de ensayos SERVOSIS ME401/1, se ha comprobado como un cubo formado a partir de láminas del elastómero era capaz de comprimirse hasta más de un tercio de su tamaño manteniendo las láminas unidas entre sí.

Comprobada la buena cohesión y adhesión del adhesivo, se ha considerado oportuno estudiar si las propiedades mecánicas a tracción de este mejoran debido a las sinergias surgidas por la unión de varias láminas de este material entre sí. La posible conclusión obtenida a partir de estas pruebas, puede tener potencial en las futuras aplicaciones estructurales.

Para ello, se podría reproducir el ensayo de tracción uniaxial con tres láminas colocadas por separado en las mordazas y con otras tres unidas entre sí formando un prisma rectangular. Las velocidades empleadas en el ensayo para los dos grupos de especímenes vuelven a ser las empleadas en el ensayo de tracción uniaxial.

El objetivo del ensayo consiste en la búsqueda de correlaciones entre las curvas tensión-deformación del bloque y las láminas por separado.

Se sugiere emplear las siguientes configuraciones:

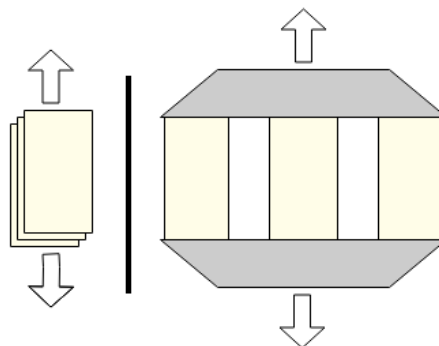


Fig. 6.2: Montaje del ensayo de sinergias, a la izquierda se muestra el boceto del bloque hecho a partir de tres láminas pegadas, a la derecha, las tres láminas aseguradas en las mordazas por separado.



### **6.4.3. Estudios del comportamiento electromecánico**

Para completar los estudios mecánicos, es necesario atender a la otra vertiente más significativa después de la mecánica en los elastómeros dieléctricos: la eléctrica.

Dada la naturaleza de los PEA, es trivial identificar la relación entre las propiedades mecánicas y eléctricas como un aspecto clave. Para poder estudiar ambos bloques de propiedades al mismo tiempo, existen ciertos montajes y procedimientos ya probados y ampliamente explicados en la literatura consultada [3-5], [9]. Por una parte, resultaría interesante estudiar las propiedades mecánicas en un ensayo de tracción mientras se hace circular corriente por la probeta.

Este ensayo admite multitud de configuraciones y por un lado se puede variar la intensidad, frecuencia y tensión de la corriente eléctrica, por otra, la orientación del material, la polarización de los electrodos o la velocidad de deformación del ensayo, estas son algunas de las muchas posibles variaciones de los parámetros del experimento.

Esta clase de experimentos no ha podido ser realizada en el presente estudio debido a la imposibilidad de aislar correctamente las mordazas de la máquina de tracción, al tener la máquina un marco metálico, la corriente experimentaría severas fugas cortocircuitándose, no obstante, existen montajes que harían factible este experimento.

Por ejemplo, se podría emplear pintura metálica para fijar los electrodos a los extremos de la probeta a la vez que se aísla este electrodo con más material dieléctrico de las mordazas.

Debido a las limitaciones de tiempo y recursos disponibles para la realización del estudio, estos ensayos, aunque ideados, no han podido ser llevados a cabo.

### **6.4.4. Estudios del comportamiento electro-térmico**

Como ya se ha indicado en la introducción, el efecto Joule es la ley puente entre las propiedades eléctricas y térmicas del material: un paso de corriente calienta el material reblandeciéndolo, el cual, para satisfacer las demandas de fuerza ejercida necesita todavía introducir más corriente aumentando todavía más el calor.

Para cuantificar dicho efecto, se ha pensado un experimento que se ha quedado fuera del alcance debido a falta del material necesario para realizarlo. Básicamente, el experimento consistiría en la grabación termográfica de una probeta por la que está pasando corriente.

El objetivo de esta prueba sería observar la evolución de la temperatura en la geometría del material para determinadas intensidades de corriente, con ello se pueden estudiar las mayores zonas de calentamiento y los rangos máximos de temperatura alcanzada.

De nuevo, este experimento admite multitud de variaciones, tolerando pre-estricciones diferentes y diferentes configuraciones de electrodos.

Como añadido, el ensayo se puede ampliar a una calorimetría, al obtener las variables de la transferencia de calor, se puede obtener la curva de variación de la resistividad del

material con la temperatura mediante la determinación del coeficiente térmico de resistividad.

Paralelo a esto, también se puede estudiar la variación de la resistividad del material con la temperatura directamente, mediante la introducción de probetas en una cámara climática a diferentes temperaturas mientras se mide desde fuera la resistividad con un polímetro gracias a unos cables conectados a la probeta mediante pintura metálica.

#### **6.4.5. Aplicación estructural: Impacto sobre membrana de VHB®**

Dada la alta capacidad de absorción de energía que ha demostrado tener el VHB®, uno de los experimentos que se proponen para futuros trabajos es el estudio del impacto sobre una membrana de este material.

Por un lado, este experimento permitiría transportar el problema a un estudio en dos dimensiones, por otro, permitiría extrapolar los resultados obtenidos a aplicaciones que requiriesen de dicha capacidad para absorber energía, como sensores, o estudios tipo *crash test* donde se puede emplear el material para modelar daño sobre tejido blando.

El experimento consistiría en disparar un proyectil con velocidad conocida contra una membrana cuadrada y delgada de este material para después medir, por medio de galgas la propagación de las vibraciones en los ejes X e Y. Además, el estudio se puede complementar con el estudio de la propagación dichas vibraciones en el plástico modelado como membrana hiperelástica.

Aunque se disponía del instrumental necesario para realizar el experimento, en este caso la limitación ha sido por el material disponible, aunque existen membranas de VHB® con el tamaño adecuado (500mmx500mm) el proveedor con el que se ha trabajado no era capaz de suplir dicho formato.

Otra opción sería la de componer una malla tejida con la cinta disponible, pero al intentarlo los esfuerzos han sido infructuosos, debido a que la gran fuerza adhesiva del material impedía disponer uniformemente el entramado.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Harrison J.S. Piezoelectric Polymers. ICASE. Nasa Langley Research Center. 2001
- [2] Uchino K. Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers. Penn State University. 2003.
- [3] R. E. Pelrine, R. D. Kornbluh and J. P. Joseph, "Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.64, (1), pp.77-85, 1998. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424797016579>. DOI: [//doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01657-9](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01657-9).
- [4] Ma Zhenyi *et al*, "High field electrostrictive response of polymers," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 32, (16), pp. 2721-2731, 1994. Available: <https://doi.org/10.1002/polb.1994.090321618>. DOI: 10.1002/polb.1994.090321618.
- [5] R. Pelrine, R. Kornbluh and G. Kofod, "High-Strain Actuator Materials Based on Dielectric Elastomers," *Adv Mater*, vol. 12, (16), pp. 1223-1225, 2000. Available: [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200008\)12:16<1223::AID-ADMA1223>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200008)12:16<1223::AID-ADMA1223>3.0.CO;2-2). DOI: AID-ADMA1223>3.0.CO; 2-2.
- [6] Y. Bar-Cohen (Ed.), *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles*, SPIE, 2004.
- [7] F. Carpi and E. Smela (Ed.), *Biomedical applications of electroactive polymer actuators*, Wiley, 2009.
- [8] Y. Bar-Cohen (2001). *Electroactive Polymers as Artificial Muscles - Reality and Challenges*. 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference. 10.2514/6.2001-1492.
- [9] A. Ask *et al*. "Modelling of Viscoelastic Dielectric Elastomers with Deformation Dependent Electric Properties," *Procedia IUTAM* (2015).
- [10]. EURO EAP Platform: EAP transducers and artificial muscles. Available: <http://www.euroeap.eu/index.php/eap-transducers-artificial-muscles>.
- [11] V.L.Tagarielli, R. Hildick, J. Huber, "Electro-mechanical properties and electrostriction response of a rubbery polymer for EAP applications," *Int. J. Solids Struct* (2012).
- [12] J. R. C. Dizon *et al*, "Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers," *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44-67, 2018.
- [13] C. Brioso Díez, "Fabricación Y Caracterización De Piezas De Material Compuesto Realizadas En Impresora 3D.", Universidad de Sevilla, 2016.
- [14] Gauravmago, Dilhan M. Kalyon, and Frank T. Fisher. *Membranes of Polyvinylidene Flouride and PVDF Nanocomposites with Carbon Nanotubes via Immersion Precipitation*, Hindawi Publishing Corporation *Journal of Nanomaterials*, Volume 2008, Article ID759825.

- [15] T. Lu et al, "A Constitutive Model for Soft Materials Incorporating Viscoelasticity and Mullins Effect," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 84, (2), pp. 9, 2016.. DOI: 10.1115/1.4035180 [doi].
- [16] A. Saini, D. Ahmad, K. Patra, "Electromechanical performance analysis of inflated dielectric elastomer membrane for micro pump applications", *Proc. SPIE* 9798 (2016) 979813.
- [17] J. Mehta, Y. Chandra and R. P. Tewari, "The Use of Dielectric Elastomer Actuators for Prosthetic, Orthotic and Bio-Robotic Applications," *Procedia Computer Science*, vol. 133, pp.569-575, 2018.Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918310342>. DOI: [//doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.085](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.085).
- [18] S. C. B. Mannsfeld et al, "Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers," *Nature Materials*, vol. 9, pp. 859, 2010. Available: <https://doi.org/10.1038/nmat2834>.
- [19] T. Mirfakhrai, J.D.W. Madden, R.H. Baughman, *Polymer artificial muscles*, *Mater. Today Off.* 10 (2007) 30e38.
- [20] K. Qiu et al, "3D Printed Organ Models with Physical Properties of Tissue and Integrated Sensors," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, (3), pp. 1700235, 2018. Available: <https://doi.org/10.1002/admt.201700235>. DOI: 10.1002/admt.201700235.
- [21] S.B. Lang, S. Muensit. Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers. 2006
- [22] L. Liu et al, "Understanding reversible Maxwellian electroactuation in a 3M VHB dielectric elastomer with prestrain," *Polymer*, vol. 144, pp. 150-158, 2018. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386118303446>. DOI: [//doi.org/10.1016/j.polymer.2018.04.048](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.04.048).
- [23] R. Sahu, K. Patra and J. Szpunar, "Experimental Study and Numerical Modelling of Creep and Stress Relaxation of Dielectric Elastomers," *Strain*, vol. 51, (1), pp. 43-54, 2015. Available: <https://doi.org/10.1111/str.12117>. DOI: 10.1111/str.12117.
- [24] *Plastics.Determination of tensile properties, ISO 527*, International Organization for Standardization. 2012
- [25] EURO THERM CORPORATION, Eurotherm Models 808 and 847 Digital Controllers. Installation and Operation Manual. 1988.
- [26] De la Vega Esteban, Alfonso, "Oscilaciones no Lineales De Membranas Hiperelásticas Sometidas a Presión Interna.", 2018
- [27] William D. Callister Jr. and David G. Rethwisch, "Polymer structures," in *Material Science and Engineering an Introduction*, 8th edition Wiley, pp. 532-625
- [28] Mullins, L., and Tobin, N., 1957, "Theoretical Model for the Elastic Behavior of Filler-Reinforced Vulcanized Rubbers," *Rubber Chem. Technol.*, 30(2), pp. 555–571.

- [29] Mullins, L., and Tobin, N., 1965, "Stress Softening in Rubber Vulcanizates-Part I: Use of a Strain Amplification Factor to Describe the Elastic Behavior of Filler-Reinforced Vulcanized Rubber," *J. Appl. Polym. Sci.*, 9(9), pp. 2993–3009.
- [30] S. Cantournet, R. Desmorat and J. Besson, "Mullins effect and cyclic stress softening of filled elastomers by internal sliding and friction thermodynamics model," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, (11), pp. 2255-2264, 2009. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309000080>. DOI: [//doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.12.025](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.12.025).
- [31] M. D. Riera Colom et al, "Modelización y simulación del comportamiento mecánico de materiales elastoméricos," Available: [https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od\\_\\_\\_\\_\\_272::47cfaf1c94193dde4af45f7d46144d0d](https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____272::47cfaf1c94193dde4af45f7d46144d0d).
- [32] Y. Zhao et al, "Remarkable electrically actuation performance in advanced acrylic-based dielectric elastomers without pre-strain at very low driving electric field," *Polymer*, vol.137, pp.269-275, 2018. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386117312430>. DOI: [//doi.org/10.1016/j.polymer.2017.12.06](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.12.06)
- [33] T. Ha-Anh and T. Vu-Khanh, Prediction of Mechanical Properties of Polychloroprene during Thermo-Oxidative Aging. 200524. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2005.03.016
- [34] "Polyvinylidene fluoride (PVDF) market for chemical processing industry, construction industrial, oil & gas, new energies and other applications: Global industry perspective, comprehensive analysis, size, share, growth, segment, trends and forecast, 2014 – 2020.", Zion Research. 2016. Available: <http://www.marketresearchstore.com/report/polyvinylidene-fluoride-market-z46154>.
- [35] (). 3M™ VHB™ Tape - Specialty Tape 4910. Available: <https://3m.citration.com/pif/000344?locale=en-US>.

## ANEXO A. HOJA DE PROPIEDADES DE VHB® 4910F<sup>1</sup>

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
<b>Tipo de adhesivo</b>	Acrílico
<b>Espesor (ASTM D-3652)</b>	
Cinta	1,00 mm
Protector	0,13 mm
Total	1,13 mm
<b>Densidad</b>	960 kg/m <sup>3</sup>
<b>Protector</b>	Película de polietileno rojo
<b>Color de la cinta</b>	Transparente: no se garantiza su transparencia óptica
<b>Vida en almacén</b>	24 Meses en el envase original a 21°C y un 50% de HR

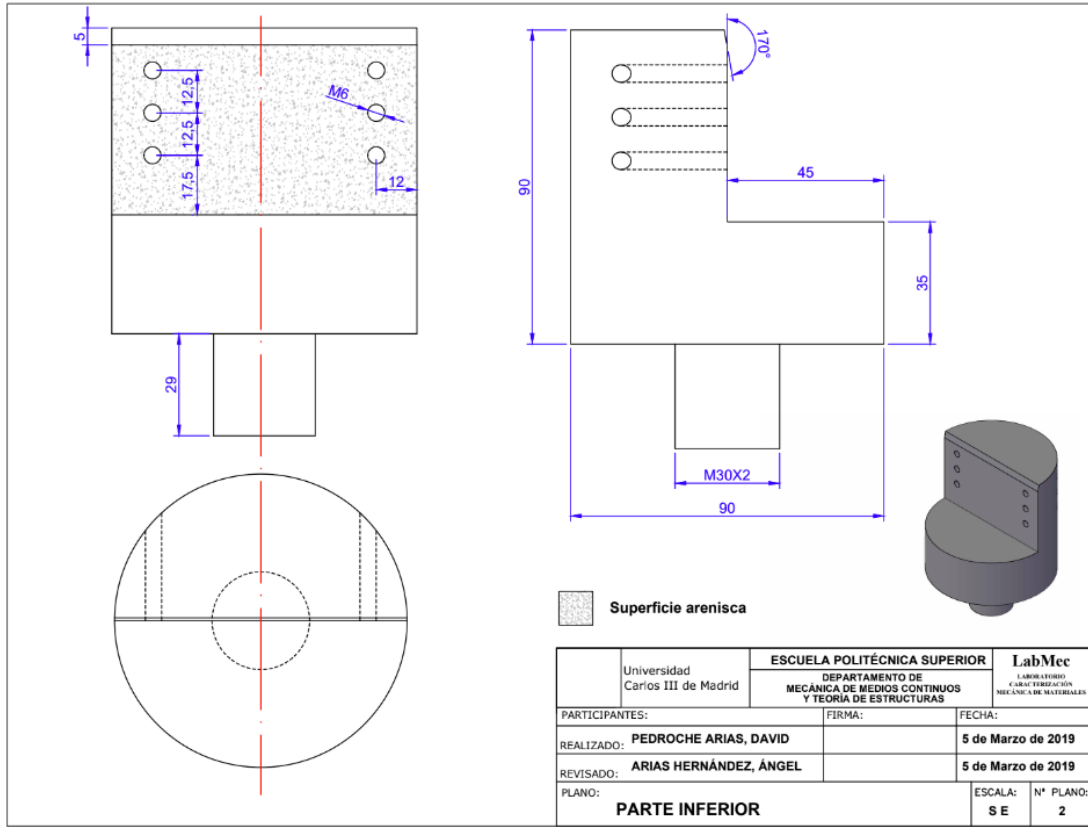
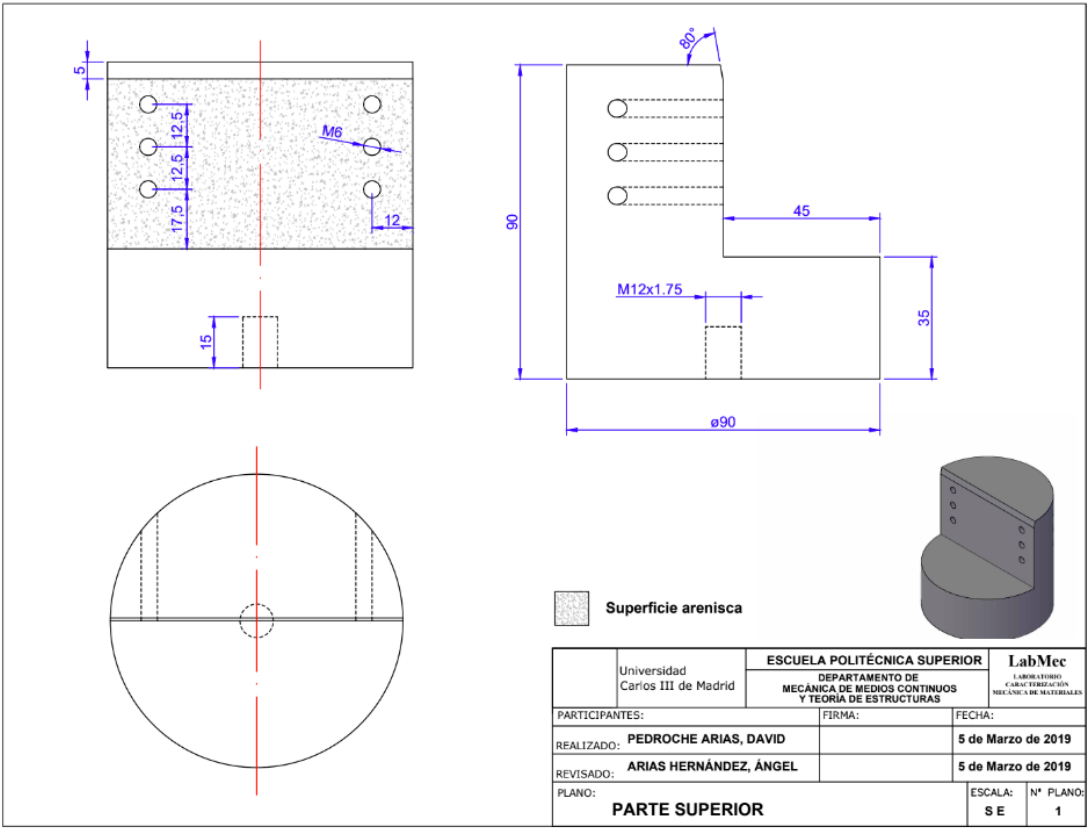
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
<b>Adhesión a pelado</b> (Sobre acero inoxidable, ángulo de 90º, velocidad de 300mm/min)	26 N/cm
<b>Resistencia a cizalladura estática</b> Peso sostenido durante 10.000 minutos sobre acero inoxidable con un área de solapamiento de 3.23 cm <sup>2</sup>	1000g @ 22°C 500g @ 66°C 500g @ 93°C
<b>Tracción normal (bloque en T)</b> En aluminio, a temperatura ambiente, 6.45 cm <sup>2</sup> , velocidad de 50 mm/min	69 N/cm <sup>2</sup>
<b>Resistencia a temperatura</b> Máx: minutos/hora Máx: continuo días/semanas	150 °C 93°C
<b>Resistencia a disolventes</b>	Sin degradación aparente cuando se expone a la prueba de salpicadura con la mayoría de los disolventes (incl. Gasolina, alcoholes minerales, aceite de motor, acetona y amoníaco )
<b>Resistencia a U.V.</b>	No se observan variaciones después de 346 horas en QUV

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE OPERACIÓN	
<b>Módulo de cizalladura</b>	6 X 10 <sup>5</sup> Pa
<b>Coeficiente de Poisson</b>	0.49
<b>Coeficiente de expansión térmica</b>	180 x 10 <sup>-6</sup> m/m/°C

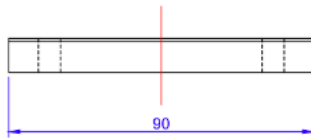
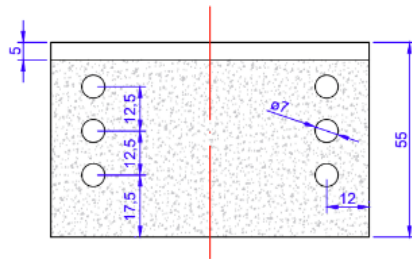
<sup>1</sup> Obtenidas de la página web de 3M [\[35\]](#).

PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS			
Propiedades	Valores	Método	Condición del Test
Constante dieléctrica	3.21	ASTM D150	1 Khz, Temperatura ambiente
Constante dieléctrica	2.68	ASTM D150	1 Mhz, Temperatura ambiente
Factor de disipación	0.0214	ASTM D150	1 Khz, Temperatura ambiente
Factor de disipación	0.0595	ASTM D150	1 Mhz, Temperatura ambiente
Resistencia dieléctrica	25 V/ $\mu$ m	ASTM D140	
Conductividad térmica	0.16 W/m/K		
Resistividad Volumétrica	$3.1 \times 10^{15} \Omega\text{cm}$	ASTM D257	Temperatura ambiente
Resistividad Superficial	$>10^{16} \Omega/\text{sq}$	ASTM D257	Temperatura ambiente

ANEXO B. PLANOS DEL ÚTIL DE FIJACIÓN TRANSVERSAL



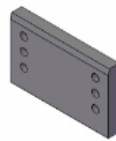




**2 PIEZAS**

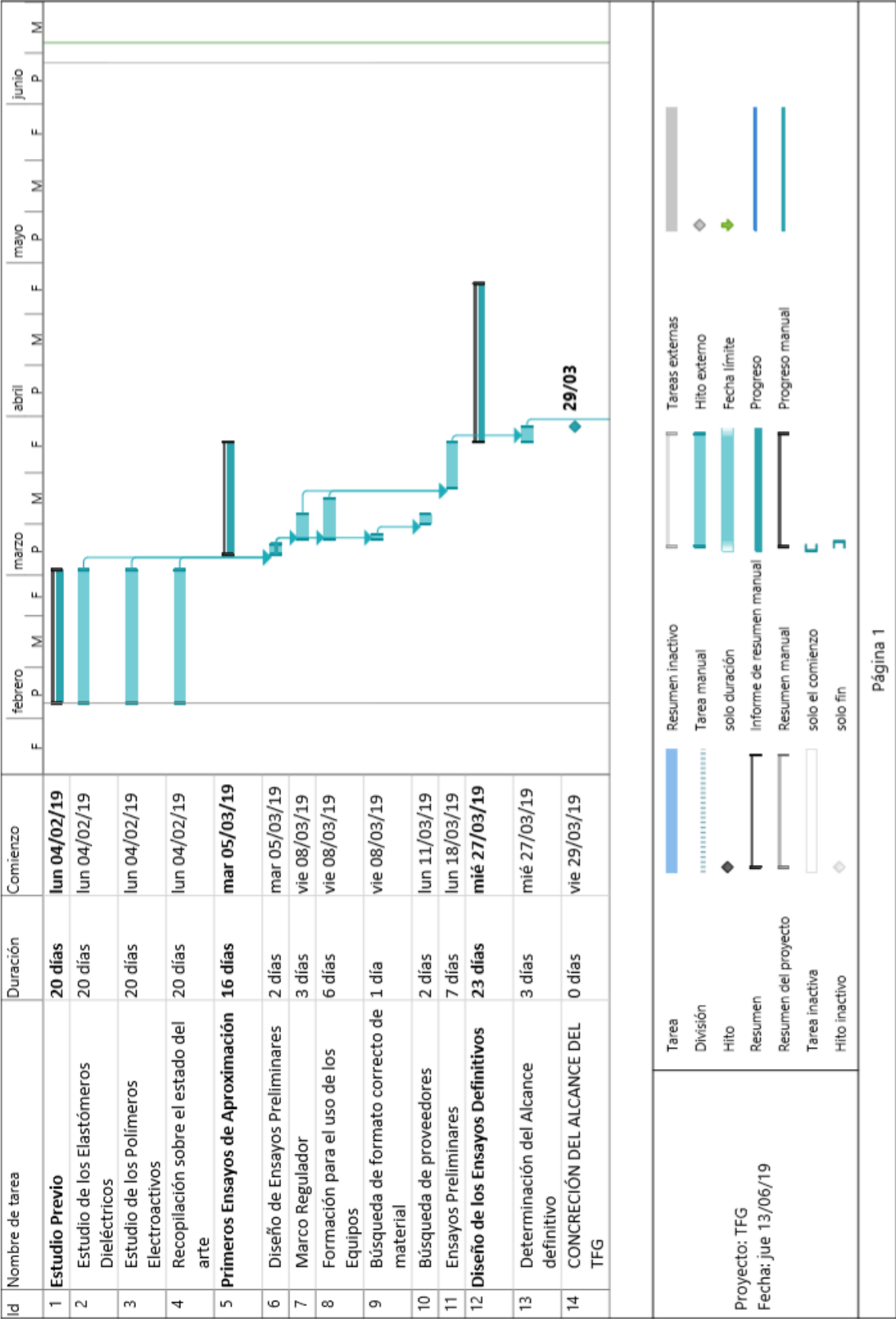


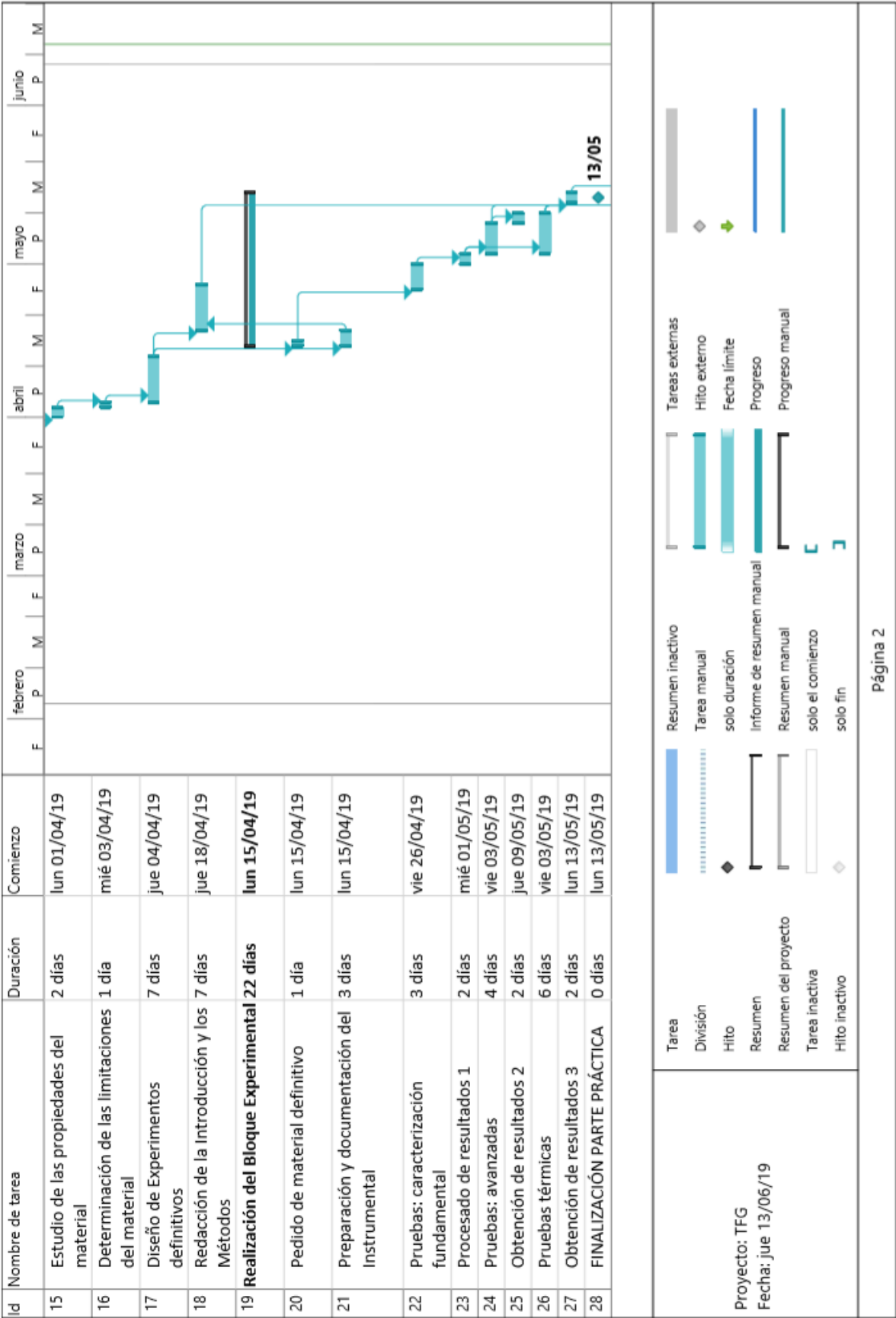
**Superficie arenisca**

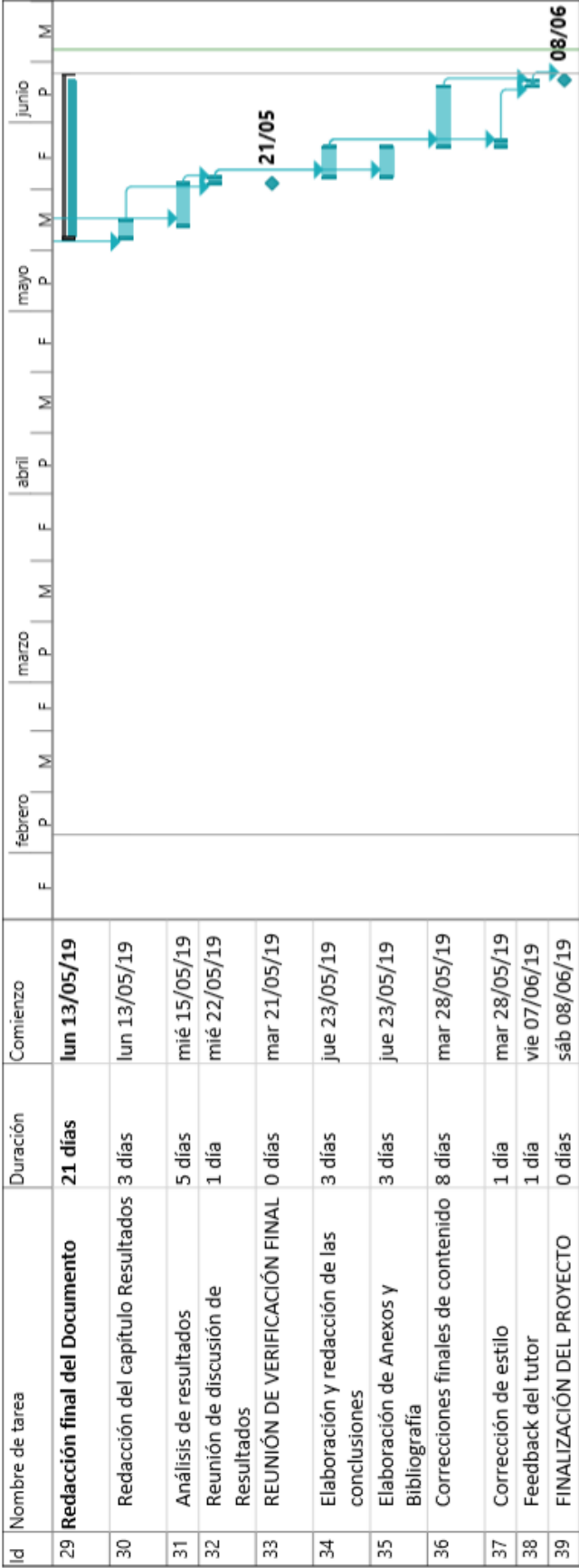


	Universidad Carlos III de Madrid	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR	LabMec
		DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS	LABORATORIO CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES
PARTICIPANTES:		FIRMA:	FECHA:
REALIZADO: PEDROCHE ARIAS, DAVID			5 de Marzo de 2019
REVISADO: ARIAS HERNÁNDEZ, ÁNGEL			5 de Marzo de 2019
PLANO: <b>TAPAS</b>			ESCALA: S E Nº PLANO: 3

ANEXO C. DIAGRAMA DE GANTT







Tarea

División

Hito

Resumen

Resumen del proyecto

Tarea inactiva

Hito inactivo

Resumen inactivo

Tarea manual

solo duración

Informe de resumen manual

Resumen manual

solo el comienzo

solo fin

Tareas externas

Hito externo

Fecha límite

Progreso

Progreso manual

Proyecto: TFG

Fecha: jue 13/06/19

